

**COMPORTAMIENTO MECÁNICO E HIDRÁULICO DE UN TALUD TIPO ARENO-  
LIMOSO DEBIDO A UNA CARGA HIDRÁULICA GENERADA POR  
PRECIPITACIONES**

**DIEGO FERNANDO CULCHAC BENAVIDES  
JUAN FERNANDO AGUIRRE TERMAL**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMATICA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
SANTIAGO DE CALI  
DICIEMBRE, 2016**

**COMPORTAMIENTO MECÁNICO E HIDRÁULICO DE UN TALUD TIPO ARENO-  
LIMOSO DEBIDO A UNA CARGA HIDRÁULICA GENERADA POR  
PRECIPITACIONES**

**DIEGO FERNANDO CULCHAC BENAVIDES  
JUAN FERNANDO AGUIRRE TERMAL**

Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero civil

**DIRECTOR  
PH.D. MANOLO GALVÁN CEBALLOS**

**CODIRECTOR  
PH.D. EFRAÍN DEL RISCO MORENO**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMATICA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
SANTIAGO DE CALI  
DICIEMBRE, 2016**

## **NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

**Presidente del Jurado**

---

**Jurado**

---

**Jurado**

**Santiago de Cali, Diciembre del 2016**

## **DEDICATORIA**

A mis padres, mis hermanos y mi novia ya que gracias a ellos no hubiese conseguido estar donde estoy.

Quiero dedicar esto a mis Padres, hermanas y novia, por su ayuda, apoyo e infinita colaboración para que cada uno de mis sueños y metas se haga realidad y cada día ser una mejor persona y avanzar en este largo camino. Stay heavy.

## **AGRADECIMIENTO**

Primero agradecer a Dios por darnos la fortaleza en esos momentos difíciles y a todas esas personas que hicieron esto posible; en especial a mi compañero de mil batallas, a mis directores por su orientación, al profesor Carlos Manrique y a don Noé Duran por su disponibilidad para colaborarnos siempre

## Tabla de Contenido

<b>RESUMEN</b> .....	1
<b>1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA</b> .....	2
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	3
2.1 Objetivo general .....	3
2.2 Objetivos específicos .....	3
<b>3. JUSTIFICACIÓN</b> .....	4
<b>4. MARCO REFERENCIAL</b> .....	7
4.1 ANTECEDENTES .....	7
4.1.1 Relación entre los movimientos en masa y las lluvias.....	8
4.2 ESTADO DEL ARTE.....	10
4.2.1 Caracterización del suelo .....	10
4.2.2 Evaluación de deslizamientos en suelos .....	10
4.2.3 Amenaza por movimientos en masa.....	11
4.2.4 Estabilidad de taludes .....	11
4.2.5 Control de la erosión.....	11
4.2.6 Erosión hídrica .....	12
4.2.7 Erosión por las gotas de lluvia o erosión por salpicamiento .....	12
4.2.8 Simuladores de lluvia .....	15
4.2.8.1 Simuladores por goteo.....	15
<b>5. METODOLOGIA</b> .....	17
5.1 TALUD ARENO-LIMOSO .....	17
5.1.1 Localización de sectores para determinar las posibles fuentes del suelo a utilizar. ....	17
5.1.2 Selección y extracción del suelo.....	18
5.1.3 Clasificación de las muestras.....	19
5.1.3.1 Granulometría suelo 1 .....	19
5.1.3.2 Límites de atterberg suelo 1.....	20
5.1.3.3 Granulometría suelo 2 .....	21
5.1.3.4 Límites de atterberg .....	21
5.1.3.5 Límites de atterberg suelo 2.....	21
5.1.3.6 Determinación permeabilidad suelo 2.....	22
5.1.4 Suelo Areno – limoso.....	24
5.1.4.1 Suelo (40%)- Arena (60%) .....	24
5.1.4.1.1 Clasificación .....	25

5.1.4.1.2	Permeabilidad .....	26
5.1.4.2	Suelo (30%)- Arena (70%) .....	27
5.1.4.2.1	Clasificación .....	27
5.1.4.2.2	Permeabilidad .....	28
5.1.4.3	Suelo (20%)- Arena (80%) .....	29
5.1.4.3.1	Clasificación .....	29
5.1.4.3.2	Permeabilidad .....	30
5.1.4.4	Suelo (10%)- Arena (90%) .....	31
5.1.4.4.1	Clasificación .....	31
5.1.4.4.2	Permeabilidad .....	32
5.1.5	Resistencia al corte .....	33
5.1.6	Selección del suelo óptimo para la construcción del talud. ....	34
5.1.7	Humedad optima de compactación. ....	34
5.1.8	Geometría del talud .....	35
5.1.9	Construcción del talud .....	36
5.1.9.1	Preparación del material .....	36
5.1.9.2	Armado y compactación del talud .....	37
5.2	SIMULADOR DE LLUVIA .....	39
5.2.1	CARACTERÍSTICAS .....	39
5.2.2	MODELO DE CONSTRUCCIÓN .....	39
5.2.3	TENSIÓN SUPERFICIAL: .....	39
5.2.4	MEDIDA DE LA TENSIÓN SUPERFICIAL .....	41
5.2.4.1	LEY DE TATE: .....	41
5.2.5	METODOLOGÍA EMPLEADA .....	43
5.2.6	DETERMINACION DEL DIAMETRO ÓPTIMO DE GOTA .....	48
5.2.6.1	MATERIALES: .....	48
5.2.6.2	FORMADOR DE GOTAS EN ACRILÍCO: .....	48
5.2.7	PROCEDIMIENTO: .....	49
5.2.8	RESULTADOS OBTENIDOS .....	51
5.3	MONTAJE EXPERIMENTAL .....	52
5.3.1	Material .....	52
5.3.2	Instalación tubería .....	52
5.3.3	Balance de volúmenes .....	53
5.3.4	Montaje .....	54
5.3.5	Base de apoyo .....	55
5.3.6	Parámetros de lluvia .....	56

5.3.6.1	Distribución del tamaño de gota.....	56
5.3.6.2	Velocidad de caída:.....	56
5.3.6.3	Energía cinética.....	57
6	RESULTADOS.....	58
6.1	Determinación de velocidades experimentales:.....	58
6.2	Energía cinética del sistema.....	58
6.3	Determinación de Intensidad de lluvia.....	59
6.4	Medición de pérdida de suelo o erosión:.....	60
6.5	Ensayos de corte pruebas finales:.....	62
7	CONCLUSIONES.....	64
8	RECOMENDACIONES.....	66
9	BIBLIOGRAFIA.....	67
10	ANEXOS.....	71



## LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1 Granulometría suelo 1</i> .....	19
<i>Tabla 2 Límites suelo 1</i> .....	20
<i>Tabla 3 Límites y clasificación de suelo 1</i> .....	20
<i>Tabla 4. Granulometría suelo 2</i> .....	21
<i>Tabla 5 Límites suelo 2</i> .....	21
<i>Tabla 6 Límites suelo 2</i> .....	22
<i>Tabla 7 Determinación permeabilidad suelo 2</i> .....	24
<i>Tabla 8 Mezcla suelo (60-40)</i> .....	25
<i>Tabla 9 Determinación granulometría suelo (60-40)</i> .....	25
<i>Tabla 10 . Permeabilidad suelo (60-40)</i> .....	26
<i>Tabla 11 Determinación granulometría suelo (70-30)</i> .....	27
<i>Tabla 12 . Permeabilidad suelo (70-30)</i> .....	28
<i>Tabla 13 Mezcla suelo (80-20)</i> .....	29
<i>Tabla 14 Determinación granulometría suelo (80-20)</i> .....	29
<i>Tabla 15 Permeabilidad suelo (80-20)</i> .....	30
<i>Tabla 16 Mezcla suelo (90-10)</i> .....	31
<i>Tabla 17 Determinación granulometría suelo (90-10)</i> .....	31
<i>Tabla 18 Permeabilidad suelo (90-10)</i> .....	32
<i>Tabla 19 Parámetros de resistencia al corte</i> .....	34
<i>Tabla 20 Determinación humedad optima</i> .....	34
<i>Tabla 21 Determinación del formador de gota, sin factor de corrección F</i> .....	44
<i>Tabla 22 Determinación del formador de gota, con factor de corrección F</i> .....	44
<i>Tabla 23 Diseño de formador de gota sin factor de corrección F</i> .....	45
<i>Tabla 24 . Diseño de formador de gota con factor de corrección F</i> .....	45
<i>Tabla 25 Materiales Utilizados</i> .....	53
<i>Tabla 26 Volumen de entrada y salida de agua</i> .....	53
<i>Tabla 27 Datos de diseño</i> .....	57
<i>Tabla 28 Velocidad de caída experimental</i> .....	58
<i>Tabla 29 Energía cinética Unitaria experimental</i> .....	59
<i>Tabla 30 Resumen datos experimentales</i> .....	59
<i>Tabla 31 Resumen Intensidades experimentales</i> .....	60
<i>Tabla 32 Resumen Intensidades experimentales</i> .....	60
<i>Tabla 33 Suelo final</i> .....	62
<i>Tabla 34 Parámetros de resistencia a corte finales</i> .....	63

## LISTA DE FIGURAS

Fig. 1 Porcentajes de emergencias (Fuente. Dirección de gestión del riesgo, 2010) .4	4
Fig. 2 Impacto de una gota sobre una película de agua (Fuente Lozano A. 2000). ..13	13
Fig. 3 Efecto de la pendiente en la pérdida de suelo por escorrentía en lotes de igual área con suelos coluviales. (Fuente. CENICAFÉ. 1949-1956).....14	14
Fig. 4 Esquema simulador por goteo (Irurtia, 1994).....16	16
Fig. 5 Visita a la zona de Las Palmas, Cali.....17	17
Fig. 6 Mapa Microzonificación Sísmica CALI (Fuente, Alcaldía Santiago de Cali). ...18	18
Fig. 7 Visita Zona del Rio Meléndez, sector de La Playa. ....18	18
Fig. 8 Curva granulométrica suelo 1 .....19	19
Fig. 9 Limite líquido suelo 1.....20	20
Fig. 10 Curva granulométrica suelo 2 .....21	21
Fig. 11 Limite líquido suelo 2.....22	22
Fig. 12 Extracción de muestra inalterada.....23	23
Fig. 13 Deformación vs Tiempo .....23	23
Fig. 14 Curva granulométrica .....25	25
Fig. 15 K vs t Suelo (60-40).....26	26
Fig. 16 Curva granulométrica.....27	27
Fig. 17 K vs T Suelo (70-30).....28	28
Fig. 18 Curva granulométrica.....29	29
Fig. 19 K vs T Suelo (80-20).....30	30
Fig. 20 Curva granulométrica.....31	31
Fig. 21 K vs T Suelo (90-10). ....32	32
Fig. 22 Permeabilidades de diferentes combinaciones de suelos.....33	33
Fig. 23 Humedad Vs gama seco máximo .....35	35
Fig. 24 . Mezclas de Limo (30%), arena (70%).....37	37
Fig. 25 Mezcla final del suelo.....37	37
Fig. 26 Compactación del talud .....38	38
Fig. 27 . Llenado de la formaleta .....38	38
Fig. 28 Talud final.....38	38
Fig. 29 Esquema atracción molecular del agua .....40	40
Fig. 30 . Fuerzas de tensión superficial en una gota de agua .....40	40
Fig. 31 Interpretación de la Ley de TATE. ....41	41
Fig. 32 . Esquema de R y r en la formación de una gota. ....42	42
Fig. 33 Volumen de una gota, tomado como el volumen esférico. ....43	43
Fig. 34 Diseño del formador de gota.....46	46
Fig. 35 . Vista en perspectiva del formador de gota .....46	46
Fig. 36 . Vista en perspectiva de la bandeja de formador. ....47	47
Fig. 37 Vista en perspectiva de la bandeja de distribución de gotas.....47	47
Fig. 38 Vista en alzada de la bandeja de distribución.....47	47
Fig. 39 Ficha técnica balanza de precisión.....48	48
Fig. 40 Formador de gotas en acrílico .....49	49
Fig. 41 Montaje experimental.....50	50

<i>Fig. 42 ESQUEMA FORMADOR DE GOTA.....</i>	<i>51</i>
<i>Fig. 43 Instalación de la conducción.....</i>	<i>52</i>
<i>Fig. 44 Simulador de lluvia .....</i>	<i>54</i>
<i>Fig. 45 Estructura para el apoyo de talud y simulador.....</i>	<i>55</i>
<i>Fig. 46 Determinación de la velocidad terminal (Laws, 1941) .....</i>	<i>56</i>
<i>Fig. 47 Montaje y disposición final del experimento.....</i>	<i>57</i>
<i>Fig. 48 Curva Intensidad – Duración .....</i>	<i>60</i>
<i>Fig. 49 Curva perdida de suelo en el talud .....</i>	<i>61</i>
<i>Fig. 50 Talud después de 25 minutos de lluvia.....</i>	<i>61</i>
<i>Fig. 51 Toma de muestras para ensayo de corte .....</i>	<i>63</i>

## LISTA DE ANEXOS

A. 1 DATOS DE CORTE.....	71
A. 2 ESQUEMA DE TALUD .....	75
A. 3 <i>DATOS DE LOS DISTINTOS ORIFICIOS DEL FORMADOR DE GOTA</i> .....	76

## **RESUMEN**

El fenómeno de deslizamientos es una de las formas más comunes de emergencias registradas en Colombia, solamente superada por las inundaciones; los principales efectos externos causantes de los deslizamientos son: causas sísmicas, orientación de las fracturas o grietas en el suelo, causas humanas como la deforestación, y las lluvias excesivas, siendo esta última causa el motivo de esta investigación.

Las variaciones drásticas en las lluvias de los últimos años han generado la degradación de los suelos, afectando la estabilidad de los perfiles inclinados o laderas. El siguiente proyecto aborda este tema desde la parte de variación de precipitaciones desarrollado a través de un simulador de lluvias por goteo, que utiliza el principio físico del vaso de Mariotte; con esto se podrá estudiar el efecto que traen las precipitaciones sobre un talud diseñado a escala en laboratorio; a través del cual se registraran los diferentes cambios físico-mecánicos del talud, como la variación de esfuerzos cortantes de las partículas del suelo. De lo anterior se generaran pautas de estudio de vulnerabilidad de estabilidad de taludes en laboratorio, generada por precipitaciones.

**PALABRAS CLAVE:** Talud, deslizamiento, simulador de lluvia, presiones neutras o de poros.

**KEYWORDS:** Slope, landslide, rainfall simulator, pore pressure.

## **1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

El clima de Colombia está determinado por los aspectos geográficos y atmosféricos que incluyen: precipitaciones, tiempos de intensidad solar, sistemas de vientos y humedad atmosférica. Estos factores actuando directamente en el gran sistema montañoso que atraviesa a Colombia ha hecho que se le asocie principalmente con las fallas de los taludes en zonas tropicales, debido a que la mayoría de los deslizamientos ocurren después de lluvias fuertes o periodos de extensas precipitaciones, que en Colombia se frecuentan en la época de fin de año especialmente.

Este fenómeno que a simple vista se toma como pasajero se prolonga y deja daños a largo plazo tales como el debilitamiento de los terrenos, lo cual provoca daños en las carreteras, en laderas y comunidades que colindan en estas zonas. Además de los daños en la estructura que rodea los terrenos surgen los problemas sociales tales como la parálisis en el transporte, de mercancías y pasajeros, debido a que los deslizamientos con frecuencia ocurren en carreteras donde se registra una vasta circulación. Instituciones del ámbito nacional como Invías y corporaciones departamentales viales han manejado el tema muy superficialmente actuando solamente cuando los deslizamientos se han originado pero no se toman medidas cautelares ni estudios que permitan evitar ésta clase de desastres a largo plazo. Los sistemas de atención y prevención de estos desastres que se han establecido y siguen vigentes hasta el momento para esta clase de desastres naturales son básicamente preventivos es decir que estos, se basan en lo que se pueda predecir mas no en un hecho verificable.

Al momento no existe una total seguridad para predecir in situ cuándo un talud pueda deslizarse en temporadas de intensas lluvias. Esto hace que este campo de investigación sea atractivo para poder desarrollar mediante ensayos, investigación y análisis de parámetros, conocimientos, que permitan identificar mejor cuando un talud puede tener un peligro potencial si en él hay exceso de precipitación y humedad superficial, incorporando así una herramienta aplicable a la ingeniería y a los problemas de la vida diaria del país.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo general**

Caracterizar el comportamiento de la estabilidad de un talud en laboratorio de tipo arenoso-limoso, sometido a una carga hidráulica generada por precipitaciones.

### **2.2 Objetivos específicos**

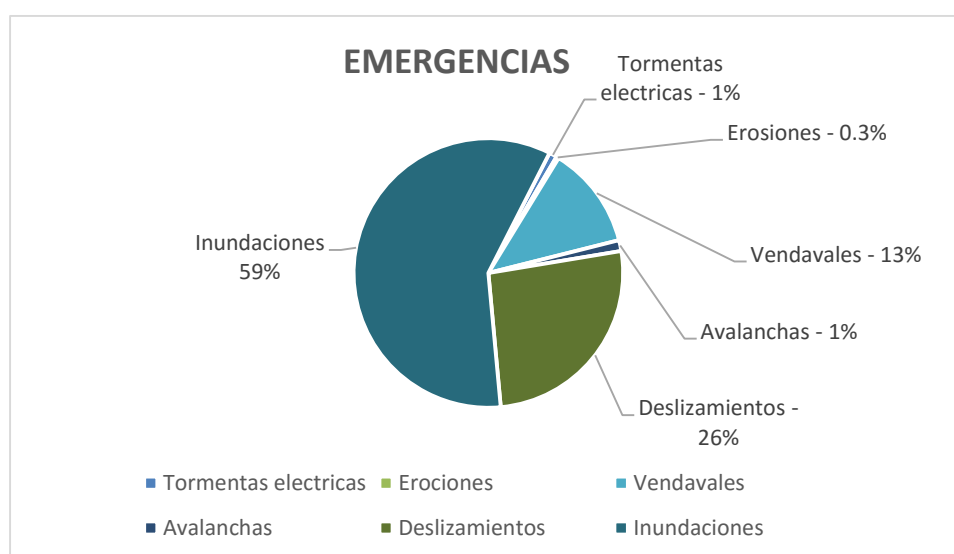
- Realizar una búsqueda bibliográfica sobre modelaciones y pruebas de laboratorio en taludes.
- Evaluar los cambios mecánicos e hidráulicos que tiene un talud arenoso-limoso cuando se somete a una precipitación variable en laboratorio.
- Desarrollar un análisis a través de un modelo que permita identificar la vulnerabilidad física que posee un talud cuando es sometido a una carga hidráulica variable.
- Generar herramientas o recomendaciones concebidas del resultado de la investigación, para prevenir o pronosticar la falla de un talud causada por este fenómeno.

### 3. JUSTIFICACIÓN

Los movimientos en masa son procesos geológicos destructivos que causan miles de muertes y daño en las propiedades por valor de decenas de billones de dólares cada año (Brabb E, 1989). Miles de personas en el mundo se afectan ante la ocurrencia de desastres naturales como terremotos, tsunamis, inundaciones, huracanes y movimientos en masa; en la región andina de Colombia, uno de los fenómenos que más causa pérdidas económicas y amenaza es el relacionado con la inestabilidad de laderas (Mantilla G, 2001).

Entre 1999 y 2003 en Colombia, han resultado afectadas 533.000 personas por año a causa de desastres naturales, de los cuales, el 5% corresponden a personas afectadas por avenidas torrenciales o deslizamientos (Sánchez, Ahmed y Awe, 2006).

Según la Dirección de Gestión del Riesgo (Fig. 1), adscrita al Ministerio del Interior y Justicia hasta el 1 de diciembre del 2010 la temporada invernal arrojaba un saldo de 167 personas muertas, 225 personas heridas y 19 desaparecidas. De acuerdo al balance (Fig. 1), se han registrado 1.381 emergencias de las cuales 812 (58%) corresponden a inundaciones, 360 a deslizamientos (26%), 18 a avalanchas (1,30%), 170 por vendavales (12,30%), 13 por tormentas eléctricas (1%) y cuatro por erosiones (0,3%) dentro de las principales causas (Sánchez E. 2011).



**Fig. 1** Porcentajes de emergencias (Fuente. Dirección de gestión del riesgo, 2010)



Para 2011, según la base de datos que presenta DesInventar (Corporación OSSO y EAFIT, 2011), una corporación que se encarga de proporcionar datos estadísticos, en la cual nos demuestra que uno de los departamentos con mayores pérdidas de vidas por deslizamientos en los últimos 40 años es el departamento del Cauca con un total de 1116 muertes y en una mayor cantidad por el departamento de Antioquia con 1712 muertes. Por otra parte, los departamentos con mayor número de viviendas afectadas por deslizamientos son los departamentos del Cauca y Nariño, con más de 10 mil unidades. La base de datos de DesInventar (Corporación OSSO y EAFIT, 2011), también hace referencia a los departamentos que reportan mayor número de registros por afectación vial, de los cuales Antioquia, Valle del Cauca, Cauca y Cundinamarca agrupan poco más del 50% del total de eventos.

Como se puede observar el fenómeno de deslizamientos en masa, a lo largo del territorio nacional colombiano, ha proporcionado grandes pérdidas tanto de vidas humanas como económicas, es por esto que mediante esta investigación se pretende contribuir al conocimiento de los procesos de falla de un talud con técnicas de inducción y con simulación de lluvia o condiciones de humedad, en modalidad a escala y de laboratorio, procesos que reproduzcan bajo condiciones controladas los efectos de la precipitación, y en especial el impacto de las gotas de lluvia sobre las propiedades físicas del suelo superficial, y las consecuencias que ello provoca en la infiltración, escorrentía y erosión. Para ello es necesario conocer los parámetros físicos que caracterizan a la lluvia natural; tales como cantidad, intensidad, tamaño de las gotas, velocidad de las mismas y así cuantificar por métodos indirectos, la energía cinética y cantidad de movimiento de la misma; para poder luego analizar los efectos mencionados anteriormente, lo cual representa una técnica novedosa para evaluar la erosión hídrica y los movimientos en masa debido a las altas precipitaciones que se presentan en taludes susceptibles a la falla en la región del Valle del Cauca.

De lo anterior, dada la importancia que cada día adquiere el fenómeno de estabilidad y además sabiendo que gran proporción de los movimientos en masa se pueden evitar, si el problema se identifica con anterioridad se podrán tomar medidas de prevención y control según corresponda. Así en este orden de ideas surge el interés

de la presente investigación, en el sentido de comprender el fenómeno hídrico que da inicio a tales movimientos y así contribuir a la generación de criterios para los sistemas de alerta temprana.

## **4. MARCO REFERENCIAL**

### **4.1 ANTECEDENTES**

En general, las fallas estructurales de taludes son el producto de una combinación de factores tales como: el relieve, la geología, la historia tectónica, así como el intemperismo y la erosión a la que ha estado sometida la zona (Mora R, 2011). Las fallas en taludes durante periodos prolongados de infiltración, son atribuidas al avance del humedecimiento dentro del cuerpo del talud. Como consecuencia de esto la resistencia al esfuerzo cortante producida por la succión se ve disminuida significativamente (Cho y Lee, 2001, 2002).

Según Brooks y Anderson (1995), en condiciones del trópico húmedo, la lluvia induce gran parte de la falla de las laderas, la cual ocurre en muchos casos en condiciones no saturadas. En estos suelos es común encontrar que los ángulos de las pendientes son mucho más altos que los ángulos de fricción. Esta resistencia adicional se gana en muchos casos debido a la succión matricial prevalente. Según los mismos autores, en el caso de eventos lluviosos de magnitud alta, la estabilidad se condiciona en gran parte por la pérdida de succión, más que por el aumento del nivel freático. En muchas ocasiones se ignoran los efectos benéficos de la succión, en la estabilidad de laderas, debido a la dificultad de instrumentar los cambios rápidos de este factor que ocurren en eventos de lluvias intensas (Salazar G, 2011).

Para analizar los efectos agua-suelo, surgió la necesidad de reproducir, bajos condiciones controladas, los efectos de la precipitación, y en especial el impacto de las gotas de lluvia sobre las propiedades físicas del suelo superficial, y las consecuencias que ello provoca en la infiltración, escorrentía y erosión. Esto, condujo desde hace años al desarrollo de diferentes mecanismos e instrumentos que tratan de simular la lluvia natural (Pla Sentis 1981; Rostagno y Garayzar 1995). Para ello es necesario conocer los parámetros físicos que caracterizan a la lluvia natural tales como frecuencia, intensidad, tamaño de las gotas, velocidad de las mismas y de esta manera poder cuantificar por métodos indirectos la energía cinética y cantidad de movimiento de la misma, para poder luego analizar los efectos mencionados anteriormente (Gastón G, 2005).

Actualmente en el mundo los modelos experimentales a escala, permiten estudiar muchos de los procesos de falla y factores detonantes relacionados con la humedad especialmente para el entendimiento de las avenidas torrenciales y los flujos mediante una instrumentación completa y relativamente económica. Es así que, para suelos de origen piroclástico en Italia, desarrollaron un modelo experimental para estudiar el comportamiento de los flujos de suelo. Dicho modelo estaba instrumentado con sensores TDR (Time Domain Reflectometry), tensiómetros de succión matricial, sensores laser, velocímetro de imagen de partícula (PIV), transductores de presión intersticial positiva y fibras ópticas (Salazar et al; 2011).

En suelos limo arenosos, mediante un modelo físico que denominó caja de infiltración con una pendiente de 18°, e instrumentado con tensiómetros de succión, se encontró que la infiltración por la lluvia causa la reducción de la succión y disminuyó el factor de seguridad tanto en un suelo homogéneo como dispuesto en capas. La duración de la lluvia controló el frente de humedecimiento. Encontró además que una lluvia de intensidad baja pero de duración larga, causó una propagación más profunda del frente de humedecimiento comparado con una lluvia de intensidad alta, pero de duración corta (Salazar et al; 2011).

En el ámbito del Laboratorio de Hidráulica, UTN-FRC, se han llevado a cabo numerosas mediciones empleando un microsimulador de lluvia portátil (Paoli, 2009); con el objeto de medir la capacidad de infiltración de los suelos en Córdoba. El microsimulador de lluvia tiene la ventaja de reproducir con más fidelidad el fenómeno de la precipitación. Numerosos autores (Marelli, 1989) muestran la importancia del impacto de las gotas en la micro capa superior del suelo en el balance hídrico, además del efecto evidente sobre la erosión superficial.

Por otra parte, en este tipo de dispositivos es posible simular una precipitación de intensidad variable en el tiempo, incluso una precipitación discontinua.

#### **4.1.1 Relación entre los movimientos en masa y las lluvias.**

Según Salazar et al. (2011), para el caso de la meseta de Bucaramanga, se ha

encontrado un efecto diferido entre las lluvias y los deslizamientos, es decir que en algunos casos existe un lapso de tiempo entre la ocurrencia de la lluvia y la del movimiento en masa, ya que los niveles piezométricos ocurren con un tiempo relativo de retraso. Igualmente reporta que aguaceros lentos pueden tener un efecto detonante debido a que se da más tiempo para que haya mayor infiltración.

El efecto del agua sobre la ladera, para producir movimientos en masa, difiere no solo en los procesos que la originan sino en las condiciones locales de los suelos. Es decir, para que ocurra un deslizamiento se requiere que coexistan críticamente, no solo la lluvia, como factor detonante, sino la susceptibilidad del medio físico, la cual está definida por sus características intrínsecas como son la geología y la geomorfología. Según el mismo autor, la lluvia acumulada es la más significativa en la formación de los deslizamientos, ya que, cuando ésta alcanza un porcentaje considerado de la lluvia anual (cercana al 30%), la probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento es alta (Salazar et al; 2011).

Según Iverson (2000), los patrones de lluvia que dan inicio a deslizamientos son muy variables. Para la ocurrencia de algunos deslizamientos se requiere de una lluvia prolongada, mientras que otros se inician después de lluvias cortas pero intensas. Estos autores mediante modelos físicos experimentales en laboratorio, han encontrado que la porosidad total y el patrón de lluvia tienen influencia sobre el tipo de falla. Los suelos investigados por ellos, fueron de porosidad alta (52%) y respondieron rápidamente a eventos lluviosos detonantes, mientras que suelos más densos, con menor porosidad (41%), respondieron más lentamente y se deslizaron en varios episodios.

Al relacionar la intensidad de la precipitación con las características físicas del suelo, se puede hablar de dos tipos de lluvias: las precipitaciones largas de baja intensidad que generan escorrentía por la saturación del suelo y las tormentas cortas de alta intensidad que generan flujos superficiales al superar la capacidad de infiltración del suelo. Con relación a esto se reporta en Chinchiná que un aguacero ocurrido después de 17 días sin lluvia causó 0.09 mm de escorrentía (Flujo de lavado) y una erosión de 0,02 ton Ha<sup>-1</sup>, en tanto que otro aguacero en esta misma localidad ocurrido después de tan solo dos días sin lluvia produjo 2,36 mm de escorrentía y 0,39 ton Ha<sup>-1</sup> de

erosión; lo cual confirma la idea de relacionar la erosión y la escorrentía con la velocidad de infiltración del suelo y la humedad del suelo (Torres et al; 2000).

Una de las formas más reconocidas para relacionar lluvias, antecedentes y diarias, con los deslizamientos es la reportada por Brand (1985), la cual favorece la interpretación de las lluvias con relación a la clasificación de los deslizamientos por su grado de severidad. Otra metodología importante y de mejor precisión es la estudiada por Crozier (1999), que trata de encontrar combinaciones críticas de lluvia diaria y lluvia antecedente (Salazar et al; 2011).

## **4.2 ESTADO DEL ARTE**

### **4.2.1 Caracterización del suelo**

El suelo es un material constituido por el esqueleto de partículas sólidas rodeado por espacios libres (vacíos), en general ocupados por agua y aire. Las relaciones entre las diferentes fases que se encuentran en el suelo (gaseosa, líquida y sólida), permiten establecer parámetros de caracterización que lo comprenden (Leoni A.).

### **4.2.2 Evaluación de deslizamientos en suelos**

Los deslizamientos son uno de los procesos geológicos más destructivos que afectan a los humanos, causando miles de muertes y daño en las propiedades por valor de decenas de billones de dólares cada año (Brabb, 1989); sin embargo, muy pocas personas son conscientes de su importancia. El 90% de las pérdidas por deslizamientos son evitables si el problema se identifica con anterioridad y se toman medidas de prevención o control de riesgos (Suarez D, 1998).

Es pertinente aclarar que cuando se habla de riesgo, este se encuentra conformado por varios factores, entre ellos la amenaza, las diversas clases de vulnerabilidad, y las debilidades que se tengan para enfrentar la amenaza.

En el desarrollo y precisión sobre el concepto y modelación del riesgo se requiere del

concurso de diversas disciplinas, sin embargo su evaluación en países como el nuestro es el Estado el que toma las decisiones conducentes al control, prevención y/o mitigación del mismo (Hernández A, 2013).

#### **4.2.3 Amenaza por movimientos en masa.**

Es la probabilidad de desplazamiento de un volumen de material in-situ, transportado o residual en un área determinada, causado por la interacción de diferentes factores internos o externos al talud y al materia presente en este.

Una de las etapas previas para la identificación y evaluación de la amenaza por taludes y laderas inestables en un área determinada, es la definición de todos los factores que intervienen en la misma. Estos factores deben ser deducibles directamente a partir de la información técnica existente y admitir una definición sencilla (Hernández et al 2013).

#### **4.2.4 Estabilidad de taludes**

Parece claro que la estabilidad de un talud depende tanto de su geometría (pendiente y altura) como de las características intrínsecas del propio suelo que lo forma (ángulo de fricción interno y cohesión) y que definen su resistencia al esfuerzo cortante. En este sentido por ejemplo un suelo sin cohesión será estable siempre y cuando su ángulo de fricción interno ( $\phi$ ) sea superior al ángulo que forma el talud con la horizontal ( $\beta$ ). En suelos cohesivos este valor aumenta dado que la fuerza de rozamiento interno que se opone al movimiento se suma a la producida por la cohesión entre las partículas.

#### **4.2.5 Control de la erosión**

La degradación física del suelo es activada por el decaimiento de las propiedades estructurales, ocasionando problemas como: encostramiento, compactación, baja rata de infiltración, alta rata de escorrentía y erosión acelerada (Lal R, 1995). La

degradación del suelo afecta la productividad de las plantas, lo que restringe las cosechas y los alimentos disponibles. En zonas de ladera el proceso de degradación que más afecta el suelo es la erosión causada por las gotas de agua lluvia (Torres, P 2000).

#### **4.2.6 Erosión hídrica**

La erosión hídrica es el proceso por el cual se fraccionan y arrastran las partículas del suelo por el impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo desnudo. Cuando la gota impacta directamente al suelo, la fuerza del impacto fracciona los agregados y los hace propensos a arrastre por la acción de los flujos superficiales de agua (escorrentía) y a la vez causa daño en la estructura superficial del perfil del suelo. Si el suelo está en zona plana, los agregados separados se depositan y producen capas, a veces minúsculas, de alta densidad y sellamiento superficial. Bajo condiciones de suelo sellado, la pérdida de suelo es poca, pero se causa daño en la estructura superficial restringiendo la entrada de agua y el flujo de gases, sin los cuales las plantas no pueden tomar alimentos o respirar. El arrastre y daño de la capa superficial del perfil del suelo, causado por el proceso erosivo, limita la vida vegetal. Si esta degradación se produce en grandes extensiones, atenta contra la seguridad alimentaria de la humanidad (Hernández et al; 2013).

El problema de erosión en Colombia puede verse por los datos del IGAC (1988), en los que se reporta un 49.5% del área nacional atacada con algún grado de erosión y de este porcentaje un 8.52% es atacado con un grado de erosión severo. El problema es tan grave que sólo para el caso del Valle del Cauca la CVC menciona que en este departamento hay un total de 238.474 ha con grado de erosión severo (Hernández et al; 2013).

#### **4.2.7 Erosión por las gotas de lluvia o erosión por salpicamiento**

El agua de lluvia ejerce su acción erosiva sobre el suelo mediante el impacto de las gotas, las cuales caen con velocidad y energía variables dependiendo de su diámetro; y también mediante la escorrentía o agua de escurrimiento, que es la cantidad de



agua de lluvia que excede a la absorción e infiltración por parte del suelo (Burgos, 1996).

Cuando los suelos no cuentan con cultivos ni cobertura vegetal, se disminuye la capacidad para absorber la energía de las gotas de lluvia, y retener sedimentos del suelo que están suspendidos en el agua de escurrimiento.

El impacto de las gotas de lluvia produce esparcimiento de las partículas del suelo; la cantidad de suelo esparcido será mayor entre mayor sea la velocidad de impacto. A medida que caen las gotas de lluvia éstas se aplanan en su parte inferior por la resistencia a la fricción. Este efecto es mayor cuanto más grandes sean las gotas, por lo que se aumenta el área del impacto de la gota. Dos terceras partes de la energía de la gota de lluvia se emplean en la formación de un cráter de impacto y en el movimiento de las partículas del suelo, y el resto en la formación de rocío (Kirkby y Morgan, 1984).



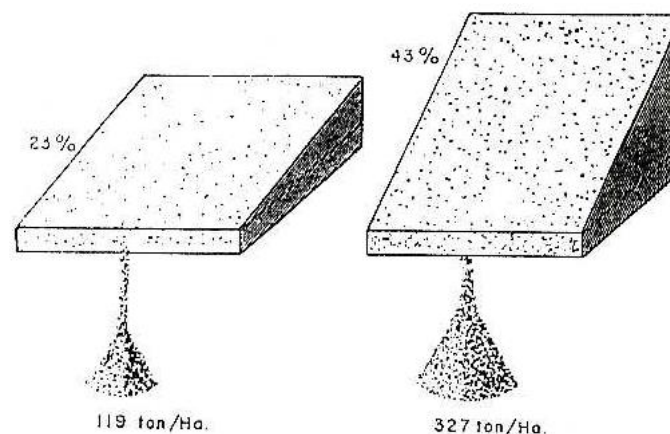
**Fig. 2** Impacto de una gota sobre una película de agua (Fuente Lozano A. 2000).

Cuando llueve, gotas de hasta 6 mm de diámetro chocan contra la superficie del suelo a velocidades de hasta 32 Km.h<sup>-1</sup>. El choque constante de las gotas contra el suelo separa las partículas y agregados, y los dispersa a distancias de hasta 0.90 m.

Cuando la lluvia cae verticalmente al suelo, la dispersión de las partículas es similar en todas las direcciones (Kent, 1983). Schwab G et, al. (1971), reportaron que la energía que confieren las gotas de lluvia al terreno, provoca desplazamientos de las partículas del suelo que alcanzan alturas de hasta 61 cm y distancias laterales de 152 cm en terrenos planos.

El impacto de las gotas es más efectivo cuando una película delgada de agua cubre la superficie del suelo, y la máxima dispersión de las partículas del mismo tiene lugar cuando la profundidad de la película es casi igual al diámetro de la gota de lluvia (Kirkby y Morgan, 1984).

Se ha observado que la cantidad de suelo salpicado por las gotas de lluvia es de 50 a 90 veces más grande que la cantidad de suelo arrastrado por el flujo superficial (Smith y Wischmeier, 1962). Se estima que en un suelo desnudo, las lluvias fuertes salpican más o menos 25 toneladas de suelo por hectárea. En terrenos planos este salpicamiento por las gotas de lluvia no es serio, pero en lugares con pendiente, la cantidad de suelo salpicado es mayor hacia las partes bajas que hacia las partes altas del terreno. Este efecto es la causa de una erosión grave en pendientes cortas y abruptas (Suárez de Castro, 1979). Ver figura 3.



**Fig. 3** Efecto de la pendiente en la pérdida de suelo por escorrentía en lotes de igual área con suelos coluviales. (Fuente. CENICAFÉ. 1949-1956)

Los factores que afectan la dirección y distancia del salpicamiento del suelo son: la pendiente, el viento, y los impedimentos al salpicamiento, tales como la cobertura

vegetal y la cobertura con residuos de cosechas anteriores. La erosión por las gotas de lluvia no sólo causa salpicamiento sino que también disminuye la agregación y destruye la estructura del suelo (Torres et al; 2000).

#### **4.2.8 Simuladores de lluvia**

La utilización de los simuladores de lluvia, ha sido de gran ayuda en el estudio de la erosión del suelo por el agua. Las principales características de la lluvia natural que se deben conseguir en los simuladores de lluvia son las siguientes (Bubenzer, 1979; Meyer, 1979).

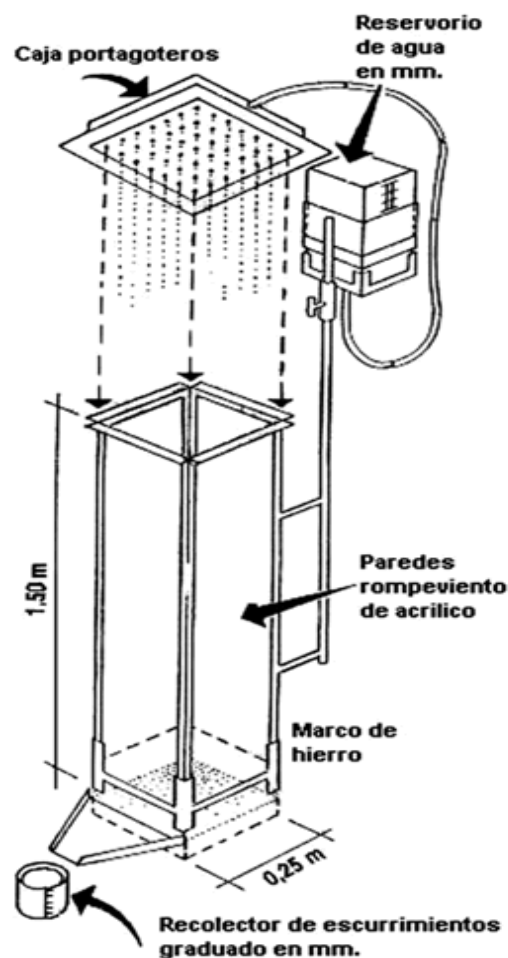
- a. Distribución del tamaño de las gotas de lluvia similar a la de la lluvia natural.
- b. Velocidad del impacto similar a la velocidad terminal de las gotas en la lluvia natural.
- c. Intensidad de lluvia correspondiente a las condiciones naturales.
- d. Energía cinética similar a la de la lluvia natural.
- e. Lluvia uniforme y distribución aleatoria de las gotas.

Según Torres et al (2000), los simuladores de lluvia se dividen en dos grandes grupos: los simuladores que utilizan el método de goteo para la producción de lluvia y aquellos que usan boquillas pulverizadoras donde las gotas salen con una determinada velocidad inicial. La diferencia radica en que con los simuladores por goteo se obtiene una mejor representación de la forma de la gota real de lluvia, una velocidad mayor, por tanto una energía cinética más próxima a la real.

##### **4.2.8.1 Simuladores por goteo.**

En esta categoría de simuladores, generalmente, orificios bajo una lámina o carga hidrostática de agua de agua producen gotas en un rango de tamaños muy limitado, estas gotas caen desde un punto inicial con velocidad cercana a cero. Consecuentemente éstos se emplean para estudios de investigación básica donde sea importante un estricto control en el tamaño de la gota, o investigaciones que fijen esta variable.

La construcción más conocida se da a través del uso del principio del vaso de Marriot, el cual posee una distribución en espiral de agujas, de jeringas hipodérmicas, y un tubo de aire integrado a un corcho para mantener una cabeza de presión constante (Fig. 4), que garantizara una velocidad de salida constante; la intensidad deseada se logra por la carga hidrostática del agua (Lozano A, 2000).



**Fig. 4 Esquema simulador por goteo (Irurtia, 1994)**

## 5. METODOLOGIA

La metodología implementada para el desarrollo de este trabajo se subdivide en tres etapas las cuales se describen a continuación.

### 5.1 TALUD ARENO-LIMOSO

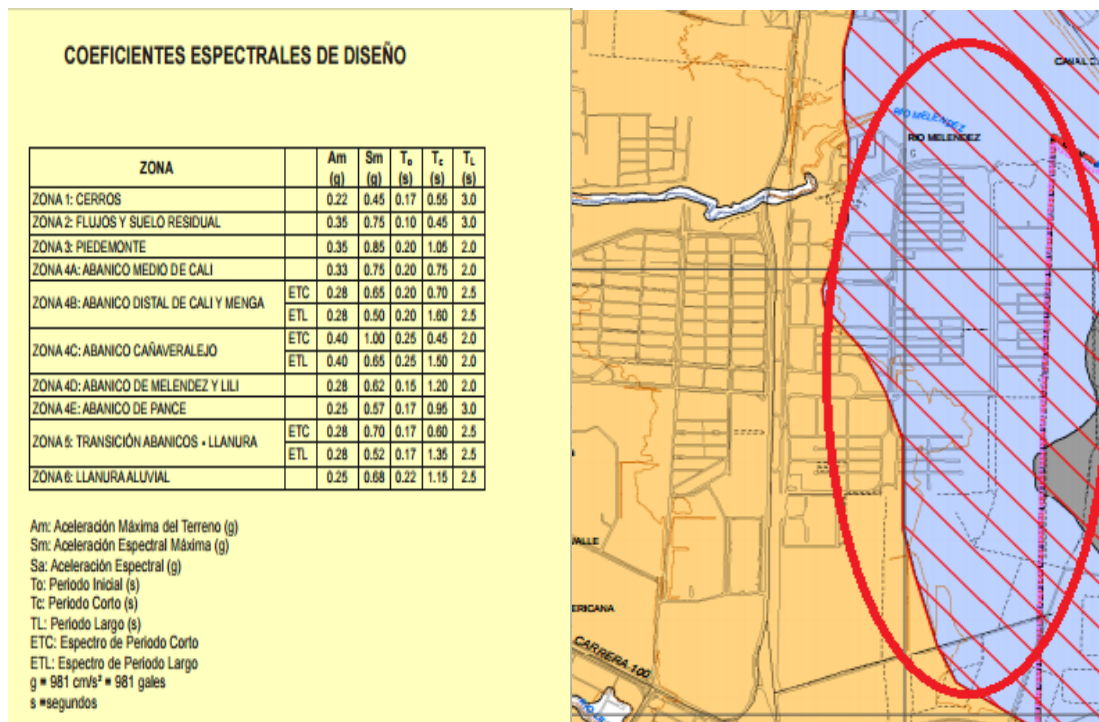
#### 5.1.1 Localización de sectores para determinar las posibles fuentes del suelo a utilizar.

De acuerdo a la metodología que se planteó, para desarrollar la construcción del talud, se procedió a buscar un suelo que cumpliera las características de un talud susceptible a la falla. Para esto se consultó en el mapa de MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE CALI, el cual muestra las distintas unidades de suelos que se encuentran a lo largo de la geografía del Municipio de Cali. A través del mapa (Fig. 6), se ubicaron diferentes zonas entre ellas están las zonas de Las Palmas Cali y la zona del río Meléndez en el sector del Barrio La Playa, lugar donde se encuentra el tipo de suelo planteado, el cual según el mapa es un tipo de zona de transición abanicos-llanuras, esta ubicación de la unidad geológica llamada formación Jamundí, corresponde a depósitos no consolidados de gravas y cantos no consolidados, compuesta por materiales de derivación local como basaltos, limos, conglomerados y areniscas que varían desde unos pocos centímetros hasta 3 metros. Estos depósitos generan morfologías principalmente suaves a ligeramente onduladas.

El estudio de la geología de la zona servirá posteriormente para obtener la aceleración sísmica del lugar y la caracterización geológica puntal del sitio donde se encuentra nuestro suelo.



**Fig. 5** Visita a la zona de Las Palmas, Cali



**Fig. 6** Mapa Microzonificación Sísmica CALI (Fuente, Alcaldía Santiago de Cali).



**Fig. 7** Visita Zona del Río Meléndez, sector de La Playa.

### 5.1.2 Selección y extracción del suelo.

Una vez determinadas las posibles fuentes de materia prima para la conformación del talud, que de acuerdo con el estudio del mapa de microzonificación (Fig. 6), se ubican

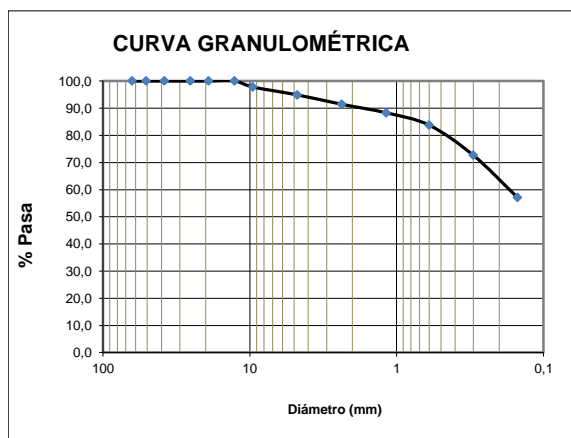
en el abanico de Meléndez y Lili, el cual posee suelos superficiales limosos, se procedió entonces con la extracción de muestras de suelo; una del sector las palmas y otra de un talud colindante al río Meléndez, en el sector de la Playa dicha extracción consistió en toma manual de muestras superficiales del suelo, para determinar la clasificación del suelo mediante ensayos como el de granulometría principalmente. Las dos muestras de suelo se denotaron como Suelo 1 a la muestra del sector Las Palmas y suelo 2 al talud La playa.

### 5.1.3 Clasificación de las muestras

#### 5.1.3.1 Granulometría suelo 1

TAMIZ	Peso retenido gr	Porcentaje retenido %	Peso lavado (gr)	269.7
			Retenido acumulado %	Porcentaje pasa %
2"	0,00	0,0	0,0	100
1 1/2"	0,00	0,0	0,0	100,0
1"	0,00	0,0	0,0	100,0
3/4"	0,00	0,0	0,0	100,0
1/2"	0,00	0,0	0,0	100,0
3/8"	0,00	0,0	0,0	100,0
# 4	5,82	2,2	2,2	97,8
# 8	7,57	2,9	5,1	94,9
#16	9,1	3,5	8,6	91,4
# 30	8,16	3,1	11,7	88,3
# 50	11,96	4,6	16,3	83,7
# 100	29,09	11,1	27,3	72,7
# 200	40,72	15,5	42,9	57,1
Pasa N°200	149,78	% arenas	42,9	
Total	262,2	% finos	57,1	

**Tabla 1** Granulometría suelo 1

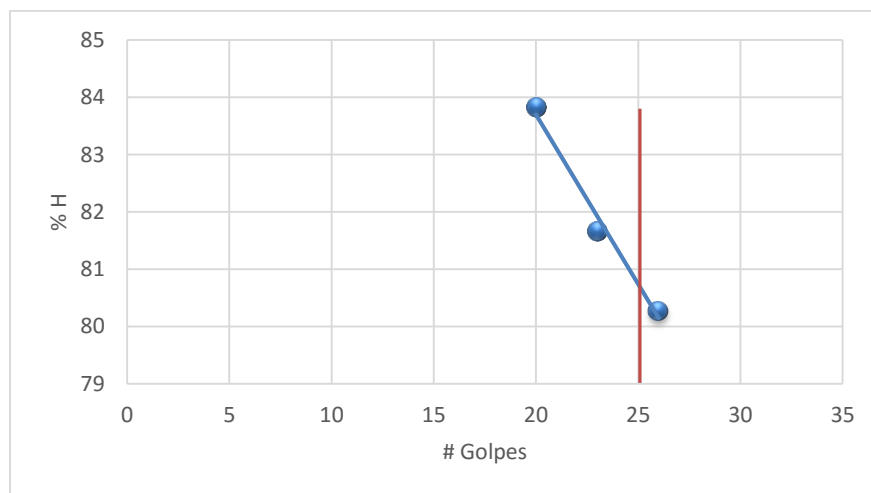


**Fig. 8** Curva granulométrica suelo 1

### 5.1.3.2 Límites de atterberg suelo 1

LÍMITE LIQUIDO Y PLÁSTICO DE LOS SUELOS					
I.N.V.I.E - 125			I.N.V.I.E - 126		
# Golpes	LÍMITE LIQUIDO			LÍMITE PLASTICO	
	26	23	20		
P <sub>1</sub> (gr)	27.14	31.75	28.62	12.96	13.57
P <sub>2</sub> (gr)	19.57	22.04	20.12	12.26	12.93
P <sub>3</sub> (gr)	10.14	10.15	9.98	9.59	10.41
Humedad %	80.3	81.7	83.8	26.2	25.4

**Tabla 2 Límites suelo 1**



**Fig. 9 Límite líquido suelo 1**

De acuerdo con el análisis de límites obtenemos la siguiente tabla, la cual muestra como resultado, que el suelo es de tipo arcilloso o **C.H**, el cual no es apto para nuestro análisis, por caracterizarse como muy poco permeable; por tanto este suelo queda descartado.

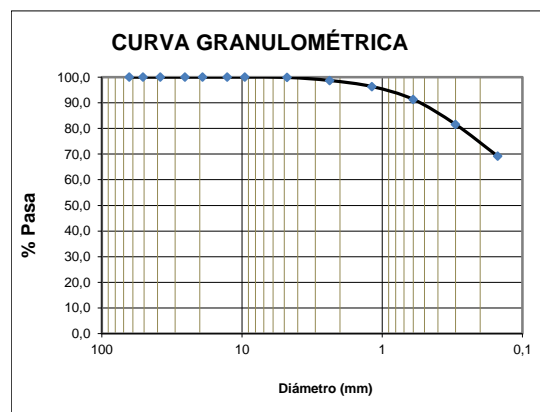
Límite Líquido %	83
Límite Plástico %	26
Índice de Plasticidad %	57
Clasificación	<b>C H</b>

**Tabla 3 Límites y clasificación de suelo 1**



### 5.1.3.3 Granulometría suelo 2

			Peso lavado (gr)	234.2
TAMIZ	Peso retenido gr	Porcentaje retenido %	Retenido acumulado %	Porcentaje pasa %
2"	0,00	0,0	0,0	100,0
1 1/2"	0,00	0,0	0,0	100,0
1"	0,00	0,0	0,0	100,0
3/4"	0,00	0,0	0,0	100,0
1/2"	0,00	0,0	0,0	100,0
3/8"	0	0,0	0,0	100,0
# 4	0	0,0	0,0	100,0
# 8	0,26	0,1	0,1	99,9
#16	2,83	1,2	1,3	98,7
# 30	5,54	2,4	3,7	96,3
# 50	11,68	5,0	8,7	91,3
# 100	22,79	9,7	18,4	81,6
# 200	29,07	12,4	30,8	69,2
Pasa N°200	162,05	% arenas	30,8	
Total	234,2	% finos	69,2	



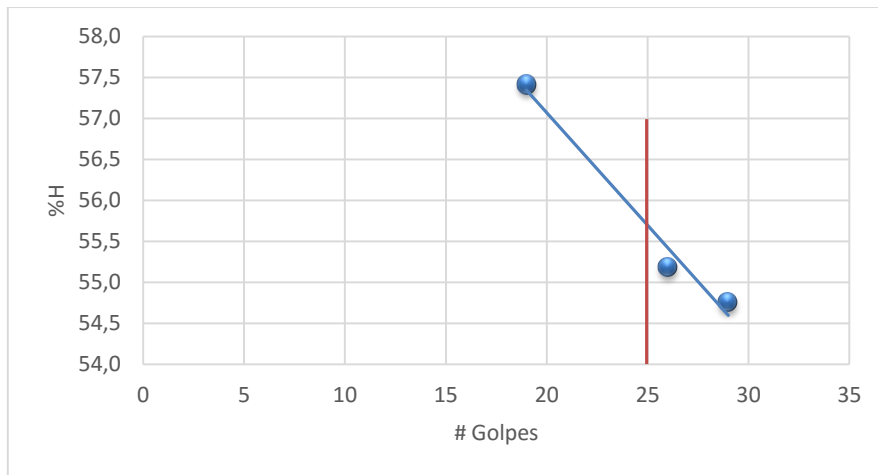
**Fig. 10** Curva granulométrica suelo 2

**Tabla 4.** Granulometría suelo 2

### 5.1.3.5 Límites de atterberg suelo 2

LIMITE LIQUIDO Y PLÁSTICO DE LOS SUELOS					
I.N.V.I.E - 125      I.N.V.I.E - 126					
# Golpes	LIMITE LIQUIDO			LIMITE PLASTICO	
	26	29	19		
P <sub>1</sub> (gr)	30.33	26.92	23.94	26.04	27.57
P <sub>2</sub> (gr)	24.05	23.93	21.5	23.9	25.48
P <sub>3</sub> (gr)	12.67	18.47	17.25	17.65	19.31
Humedad %	55.2	54.8	57.4	34.2	33.9

**Tabla 5** Límites suelo 2



**Fig. 11** Límite líquido suelo 2

De acuerdo con el análisis de límites obtenemos la siguiente tabla, la cual nos da como resultado un suelo tipo limo de alta plasticidad o **M.H**, de lo anterior este suelo puede ser apto para la realización de nuestro análisis, con lo cual procedemos hacer el ensayo de permeabilidad.

Límite Líquido %	56
Límite Plástico %	34
Índice de Plasticidad %	22
Clasificación	<b>M H</b>

**Tabla 6** Límites suelo 2

#### 5.1.3.6 Determinación permeabilidad suelo 2

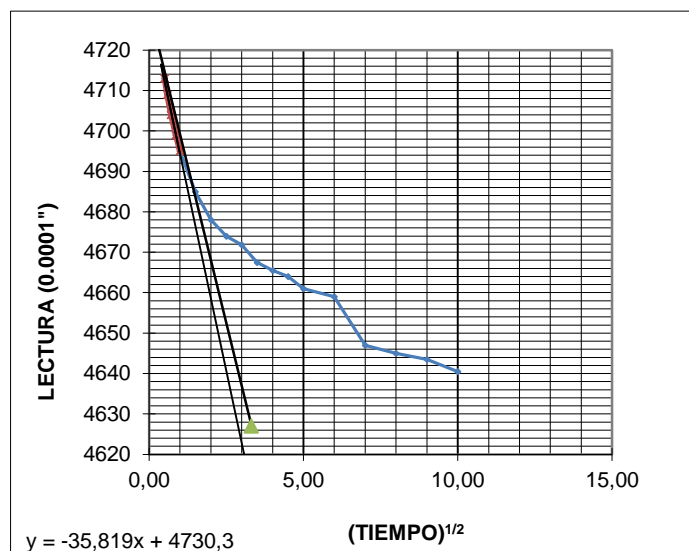
Para la realización de esta prueba y otras como la humedad y corte, necesarias para la determinación de propiedades mecánicas del suelo se procedió a obtener una muestra inalterada del suelo a través de la utilización de un tubo de pared delgada o Shelby como se muestra en la siguiente figura.



**Fig. 12** Extracción de muestra inalterada.

A la muestra de suelo 2 el cual se clasifico como un **M.H**, se le determino la permeabilidad mediante el ensayo de consolidación, donde se obtuvieron los siguientes resultados.

TIEMPO	(TIEMPO) <sup>1/2</sup>	Deformación n 10 <sup>-3</sup> mm
0	0,00	4893
0,15	0,39	
0,25	0,50	4713
0,35	0,59	4709
0,5	0,71	4704
0,75	0,87	4699
1	1,00	4695
2,25	1,50	4685
4	2,00	4678
6,25	2,50	4674
9	3,00	4672
12,25	3,50	4668
16	4,00	4666
20,25	4,50	4664
25	5,00	4661
36	6,00	4659
49	7,00	4647
64	8,00	4645
81	9,00	4644
100	10,00	4641
Lectura final		4627



**Fig. 13** Deformación vs Tiempo

y	m	b	Intercepto	Linea K
4627	-35,819	4730,3	2,9	3,3

PRESIÓN	ALTURA	H Prom.	H <sup>2</sup> Prom.	t <sub>90</sub>	Rel. VACÍOS	VARIACIÓN	Coef. de comp.	Modulo comp.	Coef. cons.	PERMEABILIDAD
Kg/cm <sup>2</sup>	cm	cm	cm <sup>2</sup>	seg		RELACIÓN	cm <sup>2</sup> /Kg	cm <sup>2</sup> /Kg	cm <sup>2</sup> /seg	cm/seg
						VACÍOS				
0,54	1,8995				1,1099					
		0,9431	0,8894	135		0,029546	0,027223	0,012902	0,00559	7,2086E-08
1,63	1,8729				1,0803					

**Tabla 7 Determinación permeabilidad suelo 2**

Con este ensayo se determinó la permeabilidad, la cual es  $7,2088 \times 10^{-8}$  cm/s, con lo cual se determinó que la permeabilidad del suelo es extremadamente lenta, resultando inapropiado para nuestro análisis.

#### 5.1.4 Suelo Areno – limoso

Después de verificar los resultados, se concluye que los suelos aquí analizados no son adecuados para utilizar en el análisis del comportamiento hidráulico del talud, debido a su baja permeabilidad.

Debido a los resultados obtenidos anteriormente se optó por realizar una mezcla en diferentes dosificaciones del suelo 2, para un en total cuatro mezclas con arena de río; es así entonces que se analizó las siguientes mezclas de suelo con arena:

- Suelo (40%) – Arena (60%)
- Suelo (30%) – Arena (70%)
- Suelo (20%) – Arena (70%)
- Suelo (10%) – Arena (90%)
- 

Dichas mezclas se describen a continuación.

##### 5.1.4.1 Suelo (40%)- Arena (60%)

Para este tipo de suelo se realizó la siguiente distribución, como se muestra en la tabla 8.

DISTRIBUCION DE LA MUESTRA	
MUESTRA TOTAL (gr)	700
ARENA(gr)	420
SUELO (gr)	280
RECIP. #99 (gr)	60

**Tabla 8** Mezcla suelo (60-40)

A dicha mezcla se le realizo el ensayo de granulometría para determinar su clasificación; a continuación se muestran los resultados obtenidos.

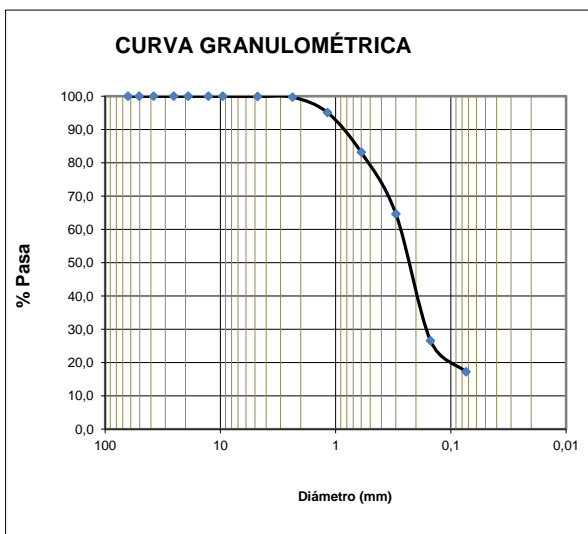
#### 5.1.4.1.1 Clasificación

##### ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO I.N.V.I.E – 123

SONDEO # 1 Muestra # 60-40

Peso inicial (gr) 700.00 Peso lavado (gr) 512.5

TAMIZ	Peso retenido gr	Porcentaje retenido %	Retenido acumulado %	Porcentaje pasa %
2"	0.00	0.0	0.0	100.0
1 1/2"	0.00	0.0	0.0	100.0
1"	0.00	0.0	0.0	100.0
3/4"	0.00	0.0	0.0	100.0
1/2"	0.00	0.0	0.0	100.0
3/8"	0.00	0.0	0.0	100.0
# 4	0.00	0.0	0.0	100.0
# 8	0.33	0.1	0.1	99.9
#10	1.13	0.2	0.3	99.7
#16	23.34	4.6	4.8	95.2
# 30	61.39	12.0	16.8	83.2
# 50	94.78	18.5	35.3	64.7
# 100	195.20	38.1	73.4	26.6
# 200	47.92	9.3	82.7	17.3
Pasa N°200	88.4	% arenas	82.75	
Total	512.5	% finos	17.3	



**Fig. 14** Curva granulométrica

**Tabla 9** Determinación granulometría suelo (60-40)

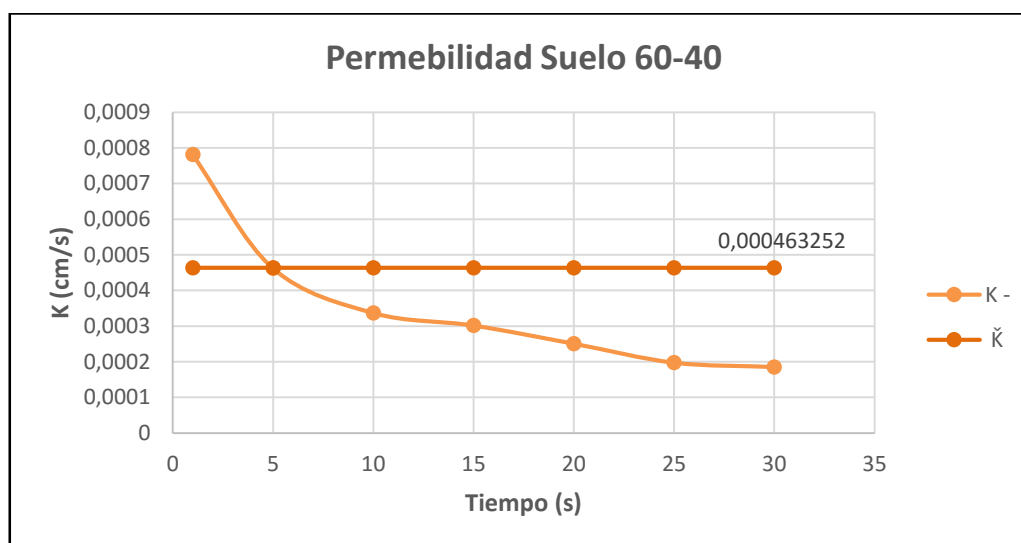
De acuerdo con el análisis granulométrico se determinó que el porcentaje de finos es mayor que el 15%, y el porcentaje de grava es menor al 15% con lo cual en la clasificación del suelo resulta ser Arena limosa (SM).

### 5.1.4.1.2 Permeabilidad

La permeabilidad se realizó mediante el permeámetro de cabeza constante que resulta ser muy práctico para este tipo de suelos.

PERMEABILIDAD 60-40					
Variables		H2 (cm)	Tiempo (s)	Dt	K (cm/s)
a (cm <sup>2</sup> )	0.56745017	140	0	-	-
A (cm <sup>2</sup> )	66.4761005	138.8	1	1	0.00078075
H1 (cm)	140	136	5	4	0.00046208
L (cm)	10.625	133.5	10	5	0.00033655
		131.3	15	5	0.00030142
K promedio (cm/s)		129.5	20	5	0.00025039
0.00046325		128.1	25	5	0.00019717
		126.8	30	5	0.00018502

**Tabla 10 . Permeabilidad suelo (60-40)**



**Fig. 15 K vs t Suelo (60-40)**

De este ensayo se determinó que para este tipo de mezcla se obtuvo una permeabilidad  $K = 0.00046325$  cm/s. Se graficó la permeabilidad en función del tiempo para observar el comportamiento de esta.

#### 5.1.4.2 Suelo (30%)- Arena (70%)

Para este tipo de suelo se realizó la siguiente distribución, como se muestra en la siguiente tabla.

DISTRIBUCION DE LA MUESTRA	
MUESTRA TOTAL (gr)	700
ARENA (gr)	490
SUELO (gr)	210
RECIP. #101 (gr)	85

Tabla N° 11 Mezcla suelo (70-30)

A dicha mezcla se le realizó el ensayo de granulometría para determinar su clasificación; a continuación se muestran los resultados obtenidos.

##### 5.1.4.2.1 Clasificación

#### ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO I.N.V.I.E - 123

SONDEO

# 1

Muestra # 70-30

Peso  
inicial (gr)

700.00

Peso  
lavado (gr)

563.2

TAMIZ	Peso retenido gr	Porcentaje retenido %	Retenido acumulado %	Porcentaje pasa %
2"	0.00	0.0	0.0	100.0
1 1/2"	0.00	0.0	0.0	100.0
1"	0.00	0.0	0.0	100.0
3/4"	0.00	0.0	0.0	100.0
1/2"	0.00	0.0	0.0	100.0
3/8"	0.00	0.0	0.0	100.0
# 4	0.00	0.0	0.0	100.0
# 8	0.26	0.0	0.0	100.0
#10	1.21	0.2	0.3	99.7
#16	22.23	3.9	4.2	95.8
# 30	52.23	9.3	13.5	86.5
# 50	120.14	21.3	34.8	65.2
# 100	228.03	40.5	75.3	24.7
# 200	52.52	9.3	84.6	15.4
Pasa N°200	86.54	% arenas	84.6	
Total	563.2	% finos	15.4	

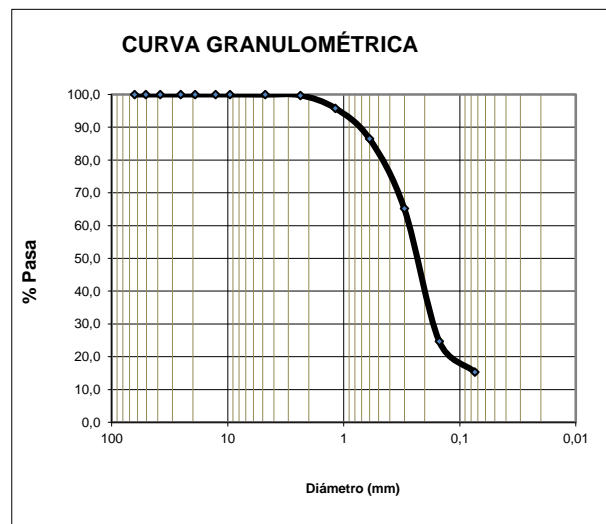


Fig. 16 Curva granulométrica

Tabla 11 Determinación granulometría suelo (70-30)

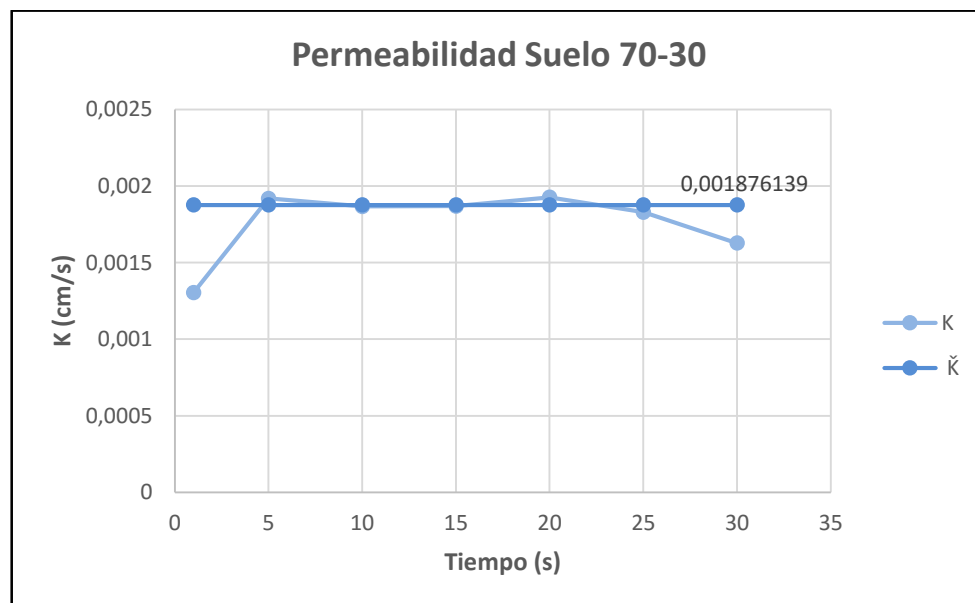
De acuerdo con el análisis granulométrico se determina que el porcentaje de finos es mayor que el 15% y el porcentaje de gravas es menor que el 15% con lo cual en la clasificación resulto ser una arena limosa.

#### 5.1.4.2.2 Permeabilidad

Al igual que la anterior mezcla la permeabilidad de esta se realizó mediante el permeámetro de cabeza variable

PERMEABILIDAD 70-30					
Variables		H2 (cm)	Tiempo (s)	Dt	K (cm/s)
a (cm <sup>2</sup> )	0.5674502	140	0	-	-
A (cm <sup>2</sup> )	66.476101	138	1	1	0.00130501
H1 (cm)	140	126.8	5	4	0.0019192
L (cm)	10.625	114.4	10	5	0.00186672
		103.2	15	5	0.00186894
		92.8	20	5	0.0019268
		83.9	25	5	0.00182883
		76.7	30	5	0.00162753

**Tabla 12 . Permeabilidad suelo (70-30)**



**Fig. 17 K vs T Suelo (70-30)**

De este ensayo se determinó que para este tipo de mezcla se obtuvo una permeabilidad  $K = 0.00187614 \text{ cm/s}$ . Se graficó la permeabilidad en función del tiempo para observar el comportamiento de la permeabilidad del suelo.



### 5.1.4.3 Suelo (20%)- Arena (80%)

Para este tipo de suelo se realizó la siguiente distribución, como se muestra en la siguiente tabla.

DISTRIBUCION DE LA MUESTRA	
MUESTRA TOTAL (gr)	700
ARENA(gr)	560
SUELO (gr)	140
RECIP. #5x4 (gr)	112

**Tabla 13** Mezcla suelo (80-20)

Igual que a las anteriores mezclas de suelo, a esta se le realizó granulometría para poder determinar la clasificación a la cual corresponde.

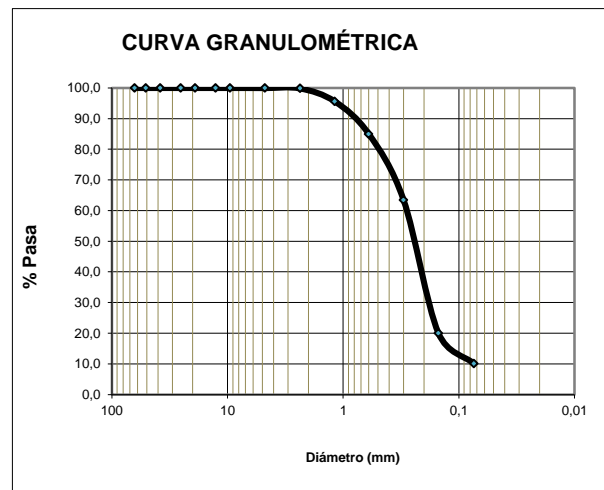
#### 5.1.4.3.1 Clasificación

#### ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO I.N.V.I.E - 123

##### SONDEO

#	1	Muestra #	80-20
Peso inicial (gr)	700.00	Peso lavado (gr)	591.0

TAMIZ	Peso retenido gr	Porcentaje retenido %	Retenido acumulado %	Porcentaje pasa %
2"	0.00	0.0	0.0	100.0
1 1/2"	0.00	0.0	0.0	100.0
1"	0.00	0.0	0.0	100.0
3/4"	0.00	0.0	0.0	100.0
1/2"	0.00	0.0	0.0	100.0
3/8"	0.00	0.0	0.0	100.0
# 4	0.00	0.0	0.0	100.0
# 8	0.13	0.0	0.0	100.0
#10	0.71	0.1	0.1	99.9
#16	25.12	4.3	4.4	95.6
# 30	62.65	10.6	15.0	85.0
# 50	127.33	21.5	36.5	63.5
# 100	256.57	43.4	80.0	20.0
# 200	58.81	10.0	89.9	10.1
Pasa N°200	59.67	% arenas	89.9	
Total	591.0	% finos	10.1	



**Fig. 18** Curva granulométrica

**Tabla 14** Determinación granulometría suelo (80-20)

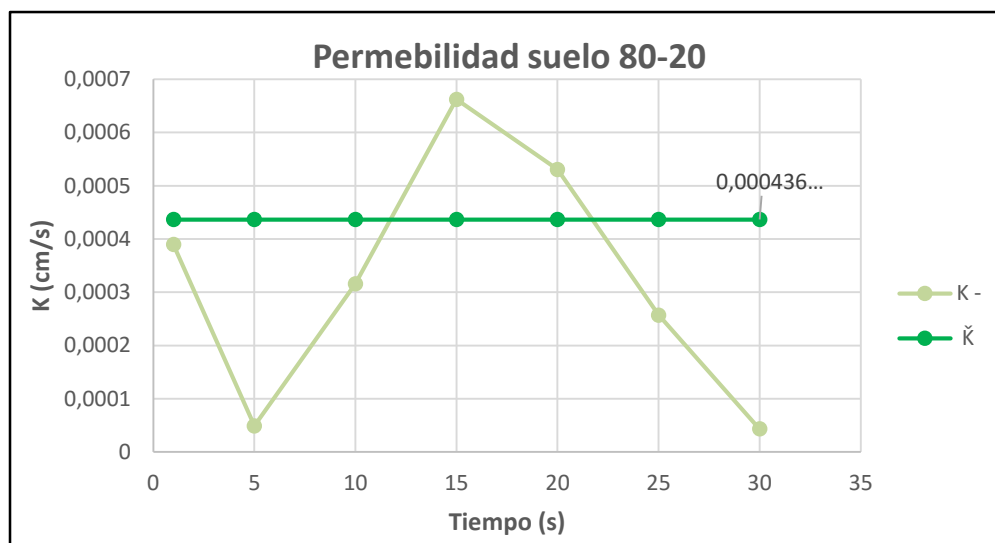
De acuerdo con el análisis granulométrico se determina que el porcentaje de finos es menor que el 15%, pero mayor que el 10% y el porcentaje de grava es menor que el 15% con lo cual se tiene que la mezcla resulto ser una arena bien gradada con limo.

#### 5.1.4.3.2 Permeabilidad

A continuación se presenta los resultados del ensayo de permeabilidad realizado con el mismo método que las anteriores mezclas.

PERMEABILIDAD 80-20					
Variables		H2 (cm)	Tiempo (s)	Dt	K
a (cm <sup>2</sup> )	0.56745017	140	0	-	-
A (cm <sup>2</sup> )	66.4761005	139.4	1	1	0.00038954
H1 (cm)	140	139.1	5	4	4.8849E-05
L (cm)	10.625	136.7	10	5	0.0003157
		131.8	15	5	0.00066214
K promedio		128	20	5	0.00053067
0.000436543		126.2	25	5	0.00025689
		125.9	30	5	4.3172E-05

**Tabla 15** Permeabilidad suelo (80-20)



**Fig. 19** K vs T Suelo (80-20)

De este ensayo se determinó que para este tipo de mezcla se obtuvo una permeabilidad  $K = 0.000436543$  cm/s. Se graficó la permeabilidad en función del tiempo para observar el comportamiento de la permeabilidad del suelo.

#### 5.1.4.4 Suelo (10%)- Arena (90%)

Para este tipo de suelo se realizó la siguiente distribución, como se muestra en la siguiente tabla.

DISTRIBUCION DE LA MUESTRA	
MUESTRA TOTAL (gr)	700
ARENA(gr)	630
SUELO (gr)	70
RECIP. #10 (gr)	67

**Tabla 16** Mezcla suelo (90-10)

A esta y al igual que las demás se le realizó granulometría, para determinar su clasificación

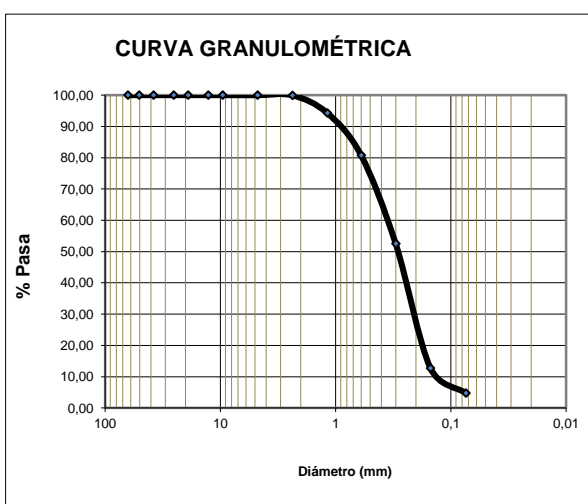
#### 5.1.4.4.1 Clasificación

##### ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO I.N.V.I.E - 123

SONDEO # 1 Muestra # 90-10

Peso inicial (gr)	700.00	Peso lavado (gr)			630.4
TAMIZ	Peso retenido gr	Porcentaje retenido %	Retenido acumulado %	Porcentaje pasa %	
2"	0.00	0.00	0.00	100.00	
1 1/2"	0.00	0.00	0.00	100.00	
1"	0.00	0.00	0.00	100.00	
3/4"	0.00	0.00	0.00	100.00	
1/2"	0.00	0.00	0.00	100.00	
3/8"	0.00	0.00	0.00	100.00	
# 4	0.00	0.00	0.00	100.00	
# 8	0.13	0.02	0.02	99.98	
#10	0.32	0.05	0.07	99.93	
#16	35.45	5.62	5.69	94.31	
# 30	84.97	13.48	19.17	80.83	
# 50	178.60	28.33	47.50	52.50	
# 100	250.41	39.72	87.23	12.77	
# 200	50.52	8.01	95.24	4.76	
Pasa N°200	30.00	% arenas	95.2		
Total	630.4	% Finos	4.8		

**Tabla 17** Determinación granulometría suelo (90-10)



**Fig. 20** Curva granulométrica

De acuerdo con el análisis granulométrico se determina que el porcentaje de finos es menor que el 5%, con lo cual se procede a calcular el coeficiente de uniformidad ( $C_u$ ) y el coeficiente de curvatura ( $C_c$ ), para determinar si es una arena bien gradada (SW) o es mal gradada (SP); obteniendo como resultado una SP.

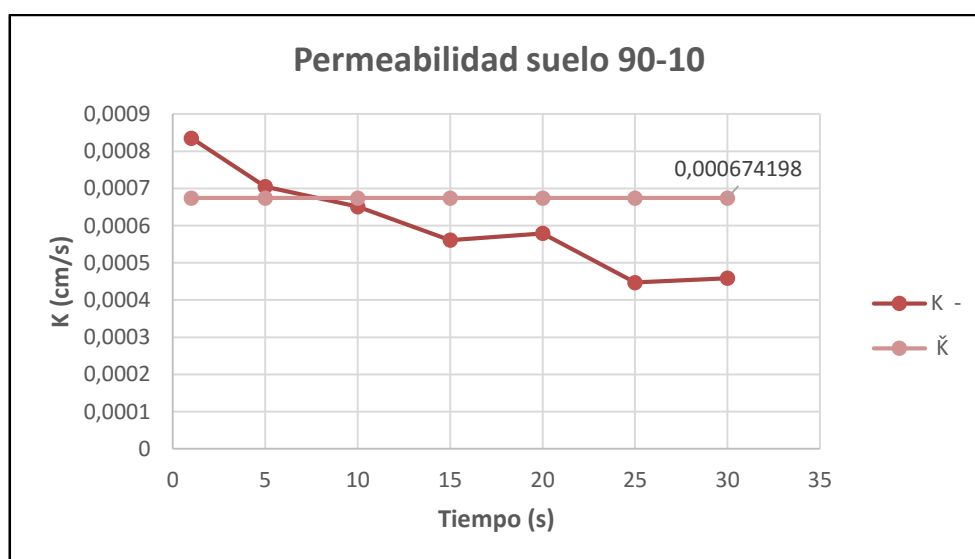
Posteriormente se procedió a determinar su permeabilidad.

#### 5.1.4.4.2 Permeabilidad

Del ensayo de permeabilidad realizado con permeámetro de cabeza variable se obtuvieron los siguientes resultados.

PERMEABILIDAD 90-10					
Variables		H2 (cm)	Tiempo (s)	Dt (s)	K (cm/s)
a (cm <sup>2</sup> )	0.56745017	140	0	-	-
A (cm <sup>2</sup> )	67.2006304	138.7	1	1	0.00083503
H1 (cm)	140	134.4	5	4	0.00070471
L (cm)	10.6	129.6	10	5	0.00065104
		125.6	15	5	0.00056122
		121.6	20	5	0.00057939
		118.6	25	5	0.00044719
		115.6	30	5	0.00045865

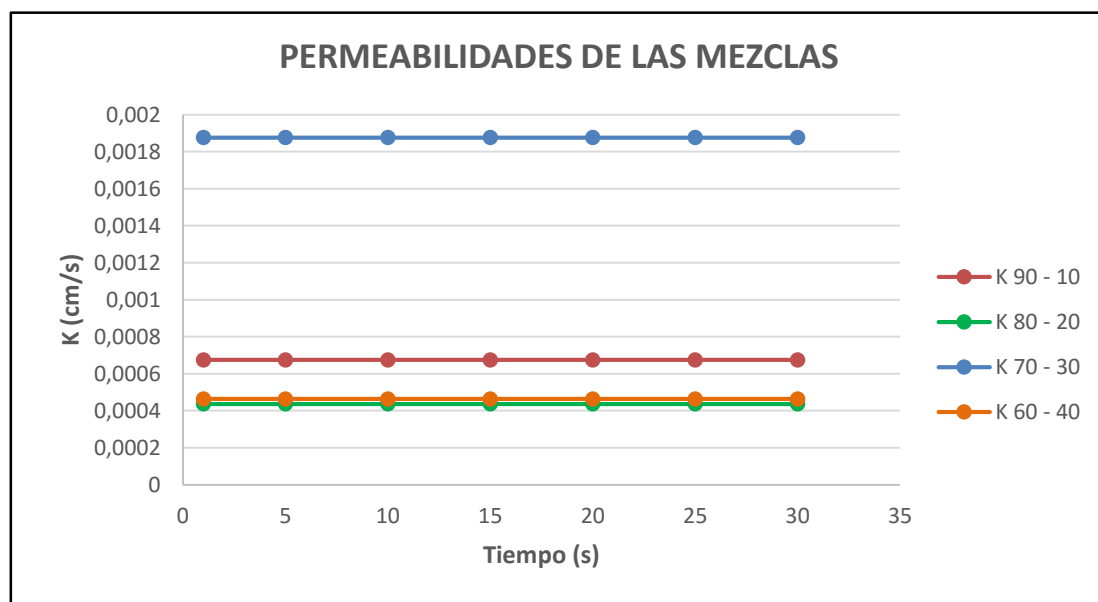
**Tabla 18** Permeabilidad suelo (90-10)



**Fig. 21** K vs T Suelo (90-10).

De este ensayo se determinó que para este tipo de mezcla se obtuvo una permeabilidad  $K = 0.0006742 \text{ cm/s}$ . Se graficó la permeabilidad en función del tiempo para observar el comportamiento de la permeabilidad del suelo.

Con los resultados de las permeabilidades obtenidas en cada una de las dosificaciones de los suelos, se construyó la siguiente figura (Fig. 22) que muestra la relación de las permeabilidades obtenidas; con estas y las granulometrías, se procedió a determinar el suelo óptimo para la construcción del talud.



**Fig. 22 Permeabilidades de diferentes combinaciones de suelos**

### 5.1.5 Resistencia al corte

A cada mezcla de suelo también se le realizó un ensayo de corte directo consolidado no drenado, para poder determinar la cohesión presente en cada mezcla y el ángulo de fricción interno. A continuación se resumen los datos obtenidos de este ensayo realizado a cada mezcla de suelo. Los cálculos de estos parámetros se presentan como anexos (ver anexo 1)

Mezcla de suelo	Cohesión ( $\text{kg/cm}^2$ )	Angulo de Fricción Interno ( $^\circ$ )
60% – 40%	0.2383	34
70% -30%	0.2183	32
80% -20%	0.1233	29
90% - 10%	0.005	26

**Tabla 19** *Parámetros de resistencia al corte*

### 5.1.6 Selección del suelo óptimo para la construcción del talud.

Una vez realizado los ensayos de granulometría con el cual se determinó cuales tipos de mezclas serian areno-limosas; el de permeabilidad el cual determina cual presenta una buena permeabilidad y el ensayo de corte que determina la estabilidad.

Una vez analizado y comparado todos estos parámetros en cada mezcla, se determinó que el suelo con 70% de arena y 30% de limo es el ideal para la construcción del talud debido a que presento un mejor comportamiento en cuanto a permeabilidad; y la mezcla de 60% y 40% a pesar de ser arena limosa y tener mejores parámetros frente al corte, es menos permeable que el 70%-30%. Por otro lado las otras dos mezclas no presentan una permeabilidad uniforme, una de ellas no clasifica como arena limosa bien gradada; resultaría muy complejo poder realizar una buena compactación para la conformación del talud.

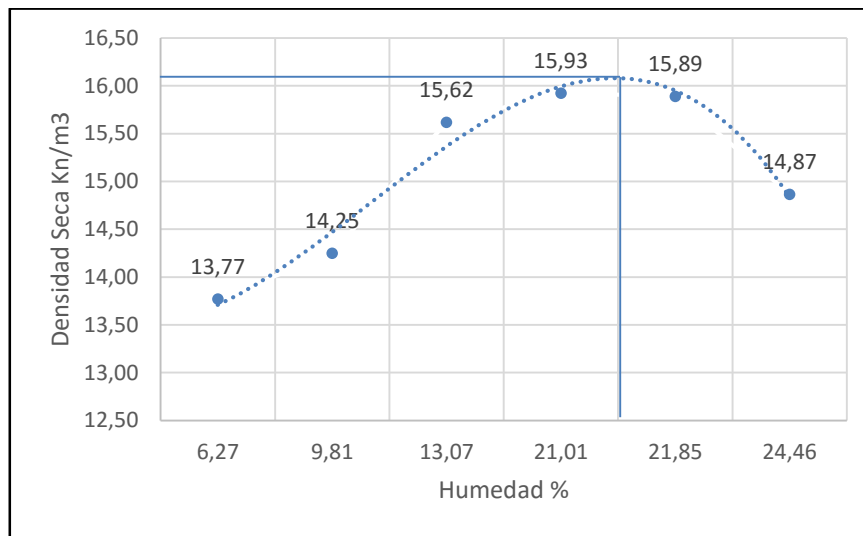
### 5.1.7 Humedad óptima de compactación.

Una vez determinada la mezcla óptima; para la construcción del talud, se continuó por determinar la humedad óptima para realizar la compactación del talud mediante el ensayo de proctor estándar, para alcanzar el 95% de la densidad seca máxima. Los resultados de dicho proceso se muestran a continuación.

Ensayo de Procto estandar						
Punto	1 (100mm) #19	2 (200mm) #18	3 (300mm) #83	4 (500mm) #301	6 (575mm) #73	5 650mm #80
peso del molde (g)	1870	1870	1870	1942	1870	1870
Peso molde + suelo (g)	3316	3416	3615	3846	3783	3698
Peso recipiente (g)	60,9	59	52	64,6	58,31	55,29
Rec + suelo humedo (g)	302,48	264,67	356,31	289,14	252,94	144,35
Rec + suelo seco (g)	288,22	246,3	321,13	250,16	218,04	126,85
Densidadhume (g/cm <sup>3</sup> )	1,464	1,565	1,766	1,927	1,936	1,850
Humedad (W)	6,273	9,808	13,072	21,007	21,849	24,455
Gama seco(KN/m <sup>3</sup> )	13,772	14,250	15,620	15,926	15,890	14,866

**Tabla 20** *Determinación humedad optima*

La siguiente figura resume los datos de la humedad máxima conseguida con el proctor estándar. De donde se deduce que la humedad óptima será del 21.5% y una densidad correspondiente a 16,34 kn/m<sup>3</sup>.



**Fig. 23** Humedad Vs Densidad seca

### 5.1.8 Geometría del talud

Retomando lo mencionado anteriormente; la estabilidad de un talud depende tanto de su geometría (pendiente y altura) como de las características intrínsecas del propio suelo que lo conforma (Angulo de fricción y cohesión) y que a su vez definen la resistencia a esfuerzo cortante. (Luis Bañón Blázquez. 2000)

Dicho de esta manera una vez determinados las características intrínsecas se procedió a definir la geometría del talud con la ayuda de un software comercial (Slide). Este procedimiento tiene como finalidad definir una geometría que arroje un factor de seguridad cercano a 1.0. Lo que se pretendía con la búsqueda de la proximidad a este factor, es que el talud fuese susceptible a la falla, con el fin de poder observarla y caracterizarla der ser posible durante las pruebas a las que el talud iba a ser sometido.

En dicha búsqueda se tuvo en cuenta que esta geometría no debía superar las dimensiones del simulador de lluvia; sino por el contrario estas debían ser inferiores

a las de este, para que la lluvia mojará toda la superficie del talud. Después de realizar varias modelaciones se determinó que la geometría que más se ajustó a dicho factor de seguridad es la que se muestra en el anexo 2 con una profundidad de 60 cm; con la cual se obtuvo un factor de seguridad de 1.195 (Anexo 3).

El volumen de talud se calculó de la siguiente manera.

- $V_t = A \times P$ ; Donde:
- $V_t$  = Volumen total del talud
- $A$  = área de la cara del talud
- $P$  = profundidad del talud

Reemplazando estos valores se tiene que:

- $V_t 720 \text{ cm}^2 \times 60 \text{ cm} = 43200 \text{ cm}^3$

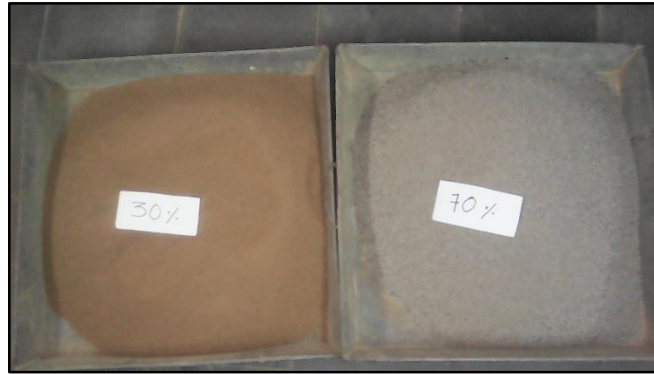
#### **5.1.9 Construcción del talud**

Una vez definido todos los parámetros de diseño se procedió con la construcción del talud usando la siguiente metodología.

##### **5.1.9.1 Preparación del material**

Como ya se había mencionado anteriormente la mezcla óptima para el talud fue la de 70% arena y 30% limo; para poder realizar esta dosificación se prepararon varias mezclas siendo el peso total de estas el 100% y de este peso total el 30% correspondía a limo y el 70% a arena. La suma de esas dosificaciones correspondería al total del volumen del talud calculado con la densidad máxima seca obtenida en el ensayo de proctor estándar más un excedente por si presentaran pérdidas durante la construcción.





**Fig. 24 . Mezclas de Limo (30%), arena (70%)**

Una vez se tenía la dosificación se procedía a homogenizar el suelo



**Fig. 25 Mezcla final del suelo**

Dentro de la preparación del suelo se tuvo en cuenta la cantidad de agua necesaria para alcanzar la máxima densidad (95%) del proctor estándar; tomando un testigo de humedad para determinar la cantidad de agua necesaria para llegar a la opima

#### **5.1.9.2 Armado y compactación del talud**

Conjuntamente con la preparación de la mezcla final de suelo, se construyó una formaleta rectangular para el armado del talud.

Para la compactación del talud se optó por realizarla en tres capas de 10 cm cada una. Para conseguir la densidad deseada se calculó la masa necesaria para generar un volumen producto de la altura de cada capa.



**Fig. 27 . Llenado de la formaleta**



**Fig. 26 Compactación del talud**

Finalmente tras el proceso de armado con formaleta y de compactación se obtuvo el talud final (Fig. 28), cuya masa es de 171,89 kilos.



**Fig. 28 Talud final.**

## **5.2 SIMULADOR DE LLUVIA**

### **5.2.1 CARACTERÍSTICAS**

- Adquisición in situ de información experimental, que permita la estimación de parámetros hidráulicos y mecánicos de la interacción suelo-lluvia tales como: capacidad de infiltración, erosión superficial, energía cinética y cantidad de movimiento.
- Desarrollar una precipitación de intensidad variable, en donde se tendrán características tales como: tamaño de gota, velocidad terminal, impacto de la gota de lluvia, distribución del formador de gotas, infiltración, carga hídrica, diseño a través de la ecuación de TATE.
- Se establece un rango de intensidades, las cuales serán estudiadas para llegar a la crítica, de acuerdo a datos de intensidades medias anuales del departamento del Valle del Cauca.

### **5.2.2 MODELO DE CONSTRUCCIÓN**

Para el modelo se comienza con el diseño del formador de gota, en donde se tiene en cuenta las siguientes características y leyes físicas:

### **5.2.3 TENSIÓN SUPERFICIAL:**

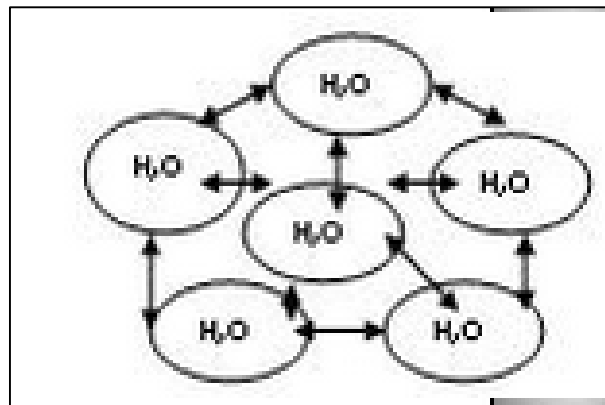
En primer lugar, es importante saber que la tensión superficial es también llamada tensión de superficie o energía de interfaz o bien energía de superficie.

Es una fuerza que existe al nivel de toda interfaz entre dos medios diferentes (entre un sólido o un líquido y un gas).

La tensión superficial permite a la gota de agua no extenderse sobre una hoja, o a ciertos insectos marchar sobre el agua, o bien todavía la tensión superficial permite esta forma abombada del agua en un vaso colmado con la noción de capilaridad.

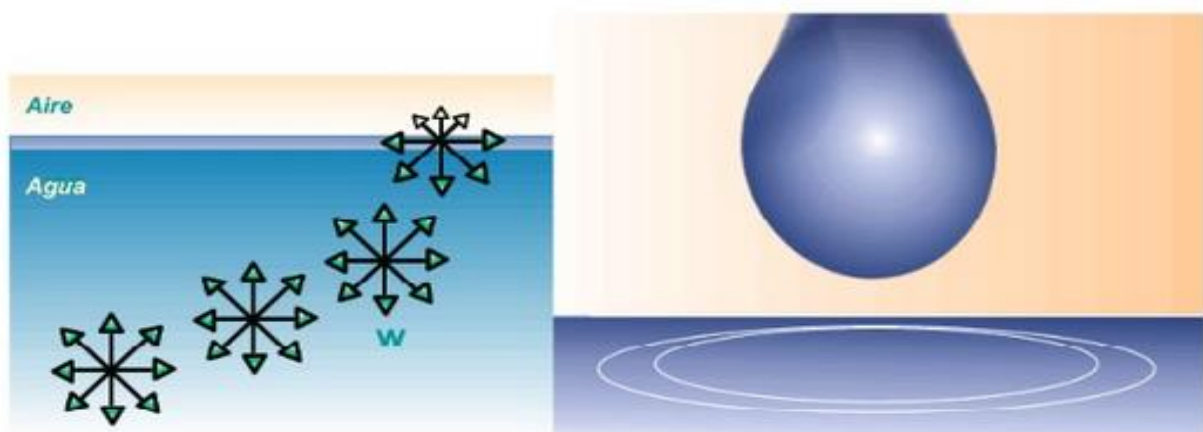
Las tensiones de superficie no son siempre fáciles a comprender. Para ser simple, tomaremos el ejemplo del agua siempre tomada en referencia porque es de simple empleo con una energía molecular muy elevada (la más elevada después del mercurio).

Las moléculas de agua son atraídas entre ellas por la energía molecular y las moléculas periféricas lo están, en dirección del interior, lo que en algunos casos forman una gota de agua (la esfera que es la forma de superficie más pequeña posible) (Fig. 29).



**Fig. 29** Esquema atracción molecular del agua

Si se coloca esta gota redonda en un soporte a escasa **energía de superficie**, las **fuerzas de atracciones internas** de la gota serán preponderantes y la gota tendrá un mínimo de contacto con el material (ej. película plástica) (Fig. 30). Si al contrario, el material (ej. vidrio) desarrolla una energía molecular de superficie que se acerca de la del agua, esta energía tenderá a contrapesar las fuerzas dentro de la gota y ésta tenderá a aumentar **su superficie interfacial** con el material, llanura de la gota, absorberencia.



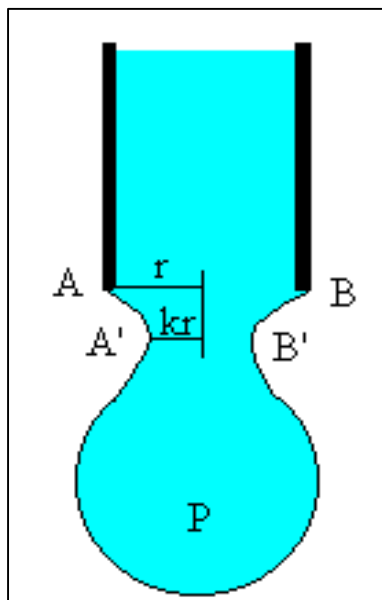
**Fig. 30 .** Fuerzas de tensión superficial en una gota de agua

## 5.2.4 MEDIDA DE LA TENSIÓN SUPERFICIAL

### 5.2.4.1 LEY DE TATE:

Tate, estudió el desprendimiento de una gota de un tubo capilar; la gota se desprende del tubo en el instante en el que su peso iguala a las fuerzas de tensión superficial que la sostiene y que actúan a lo largo de la circunferencia AB de contacto con el tubo (Fig. 31); puesto que la gota no se rompe justo en el extremo del tubo, sino más abajo en la línea A'B' de menor diámetro y que no hay seguridad de que el líquido situado entre los niveles AB y A'B' sea arrastrado por la gota.

Según el planteamiento anterior, el desprendimiento de la gota dependerá directamente de su radio y masa, es así entonces que se plantea la ecuación 1, la cual es una derivación directa del cálculo de la densidad de la misma que se deduce de la división de la masa de la gota y su volumen calculado con la ecuación 4, obteniendo así un valor determinado de masa de la gota, que afectado por el valor de gravedad nos dará como resultado el peso de la gota correspondiente a cada valor de radio R escogido.



**Fig. 31** Interpretación de la Ley de TATE.

$$W_{gota} = \pi \rho \frac{D^3}{6} \quad \text{Ec.1}$$

Siendo W o P el peso de la gota y  $\rho$  el peso específico del agua.

A través del planteamiento de las experiencias llevadas a cabo por TATE, este dedujo

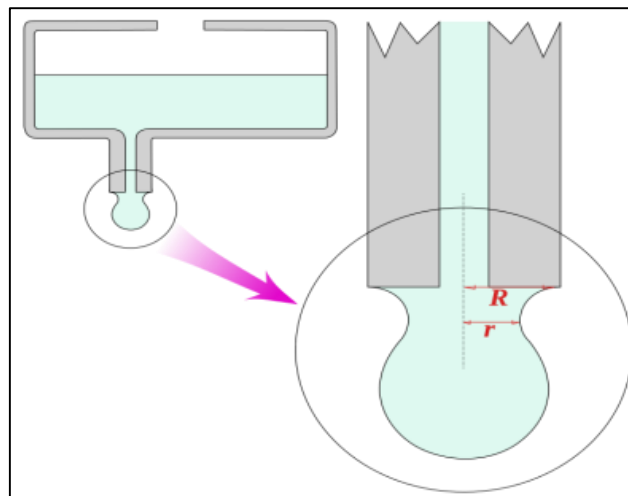
la ecuación 2, en la cual se observa que al momento del desprendimiento el peso  $W$  de la gota iguala a la fuerza de tensión superficial. Dicha fuerza es el producto del perímetro del estrechamiento, que es  $2\pi r$  por la tensión superficial  $\sigma$  (Fig. 31).

El radio  $r$  es difícil de medir directamente, pero suponemos que es proporcional a  $R$  (Fig. 32), es decir

$$K = \frac{r}{R}$$

Es independiente del líquido. Entonces,

$$W_{gota} = 2\pi k R \sigma \quad \text{Ec. 2}$$



**Fig. 32 .** Esquema de  $R$  y  $r$  en la formación de una gota.

El método del peso de la gota, sobre el cual se basa la ley de TATE, es un proceso netamente experimental, es por esto que de la ecuación de la ley de TATE (Ec.2), adoptamos un factor de corrección  $F$ , el cual relaciona las variables que son determinantes al momento de obtener el peso real de una gota, radio y volumen, estos valores y variables se relacionan en la siguiente tabla.

Correction Factors for the Drop Weight Method					
$r/V^{1/3}$	$f$	$r/V^{1/3}$	$f$	$r/V^{1/3}$	$f^*$
0.00	(1.0000)	0.75	0.6032	1.225	0.656
0.30	0.7256	0.80	0.6000	1.25	0.652
0.35	0.7011	0.85	0.5992	1.30	0.640
0.40	0.6828	0.90	0.5998	1.35	0.623
0.45	0.6669	0.95	0.6034	1.40	0.603
0.50	0.6515	1.00	0.6098	1.45	0.583
0.55	0.6362	1.05	0.6179	1.50	0.567
0.60	0.6250	1.10	0.6280	1.55	0.551
0.65	0.6171	1.15	0.6407	1.60	0.535
0.70	0.6093	1.20	0.6535		

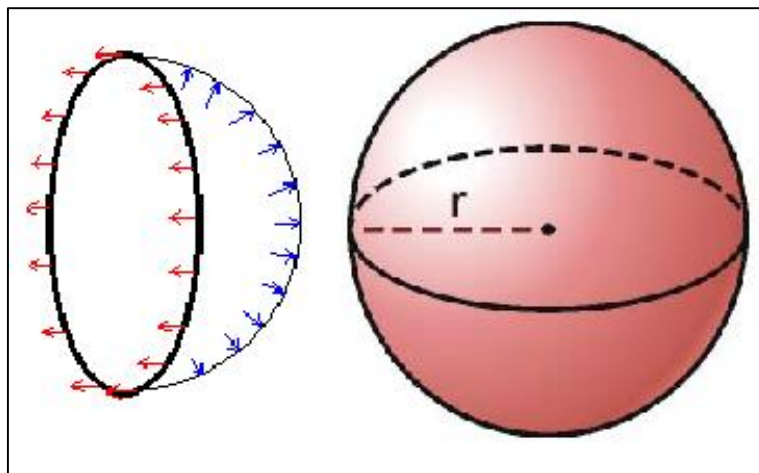
**Tabla 20.** Factor de corrección  $f$  para el método del peso de la gota (Harkins, 1916).

Quedando la ecuación 2 como:

$$W_{gota} = 2\pi r \sigma f \quad \text{Ec. 3}$$

Finalmente se deduce que el peso de una gota que sale por el extremo de un tubo es proporcional al radio de este, es decir que el radio del cuello de la gota en el momento de romperse para formarse la misma es igual al radio del tubo ( $r=R$ ); en consecuencia cuanto más grueso sea el tubo mayores serán las gotas (Burbano S, 2001).

**VOLUMEN DE LA GOTA:** Los líquidos tienden a minimizar su superficie. Por esta razón, las gotas tienen forma esférica en ausencia de gravedad. El cálculo del volumen de la gota se deduce con el volumen de la gota considerándola como esferas perfectas (Ec. 4), es decir, tomando el peso equivalente al volumen de la gota, con su forma esférica (Quintero L.).



**Fig. 33** Volumen de una gota, tomado como el volumen esférico.

$$V = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D}{2}\right)^3 \quad \text{Ec. 4 (Volumen de la esfera)}$$

### 5.2.5 METODOLOGÍA EMPLEADA

Para la elaboración del gotero, y basándonos en los conceptos anteriormente mencionados acerca de la Ley de Tate y las características físicas de una gota, elaboramos el diseño basándonos en los siguientes pasos:



1. Establecemos unos diámetros determinados, los cuales van del rango de 6 a 1 milímetros, estos acorde a la literatura descrita acerca de los diferentes diámetros que se forman en la lluvia.
2. Se determina el peso de la gota, teniendo en cuenta los diámetros planteados y empleando la ecuación 1 de la ley de Tate (Ec. 1).
3. Obtenemos el radio del capilar, es decir el radio del tubo sobre el cual se formara la gota, a partir de la ecuación 3 (Ec. 3).
4. Del radio obtenido del diámetro de gota y el tubo de capilar obtenemos el espesor del capilar, el cual se define como la resta entre estos dos valores.
5. De la ecuación 3 (Ec. 3), obtenemos dos formulaciones una con el factor de corrección  $f$ , expuesto en la tabla 22, y otro valor sin el factor de corrección  $f$  tabla 21.

FORMADOR DE GOTA SIN FACTOR DE CORRECCION			
Dgota (mm)	Wgota (gr)	R cap (mm)	Espesor tubo cap
6	0,11309734	2,42307692	0,576923077
5	0,06544985	1,40224359	1,09775641
4	0,03351032	0,71794872	1,282051282
3	0,01413717	0,30288462	1,197115385
2	0,00418879	0,08974359	0,91025641

**Tabla 21** Determinación del formador de gota, sin factor de corrección  $F$

FORMADOR DE GOTA CON FACTOR DE CORRECCION				
Dgota (mm)	Wgota (gr)	R cap (mm)	Espesor tubo cap	factor de correccion
6	0.05666768	1.21408831	1.785911687	0.50105232
5	0.03935256	0.84311688	1.656883116	0.347953
4	0.02518564	0.53959481	1.460405194	0.22268992
3	0.01416692	0.30352208	1.196477922	0.12526308
2	0.00629641	0.1348987	0.865101299	0.05567248

**Tabla 22** Determinación del formador de gota, con factor de corrección  $F$

Del modelo que hemos establecido tanto teórica como prácticamente, se ha establecido que para obtener un tamaño de gota optimo se hará una variación del radio interno del tubo capilar, para así establecer por métodos estadísticos la distribución geométrica que se adapte a nuestras condiciones requeridas para la gota, es así que se presentan las siguientes tablas que representan las variaciones que se realizaron en cuanto al diámetro interno y externo del formador de gota.



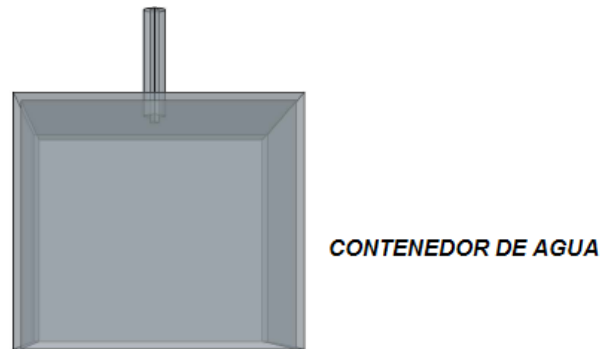
Diseño de formador de gota Sin FC			
Diametro exterior (mm)	Diametro interior (mm)	Radio interior (mm)	espesor (mm)
6	4,95	2,473	0,527
<b>6</b>	4,85	<b>2,423</b>	<b>0,577</b>
6	4,75	2,373	0,627
5	2,90	1,452	1,048
<b>5</b>	2,80	<b>1,402</b>	<b>1,098</b>
5	2,70	1,352	<b>1,148</b>
4	1,54	0,768	1,232
<b>4</b>	1,44	<b>0,718</b>	<b>1,282</b>
4	1,34	0,668	<b>1,332</b>
3	0,71	0,353	1,147
<b>3</b>	0,61	<b>0,303</b>	<b>1,197</b>
3	0,51	0,253	<b>1,247</b>
3	0,28	0,140	1,360
<b>3</b>	0,18	<b>0,090</b>	<b>1,410</b>
3	0,08	0,040	1,460

**Tabla 23** Diseño de formador de gota sin factor de corrección  $F$

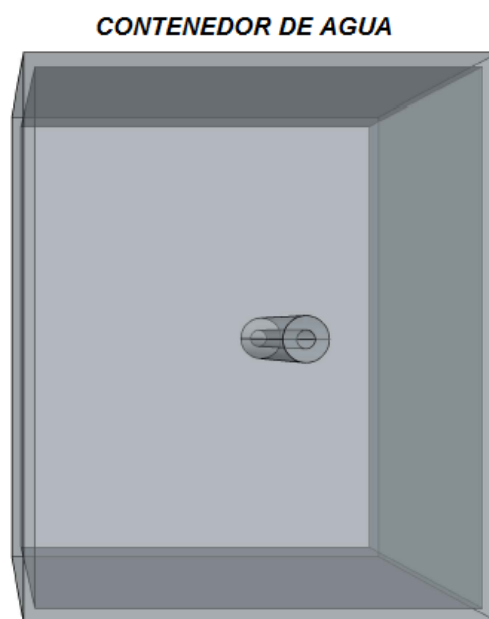
Diseño de formador de gota Con FC			
Diametro exterior (mm)	Diametro interior (mm)	Radio interior (mm)	espesor (mm)
6	2,53	1,264	1,736
<b>6</b>	2,43	<b>1,214</b>	<b>1,786</b>
6	2,33	1,164	1,836
5	1,79	0,893	1,607
<b>5</b>	1,69	<b>0,843</b>	<b>1,657</b>
5	1,59	0,793	<b>1,707</b>
4	1,18	0,590	1,410
<b>4</b>	1,08	<b>0,540</b>	<b>1,460</b>
4	0,98	0,490	<b>1,510</b>
3	0,71	0,354	1,146
<b>3</b>	0,61	<b>0,304</b>	<b>1,196</b>
3	0,51	0,254	<b>1,246</b>
2	0,37	0,185	0,815
<b>2</b>	0,27	<b>0,135</b>	<b>0,865</b>
2	0,17	0,085	0,915

**Tabla 24** . Diseño de formador de gota con factor de corrección  $F$ .

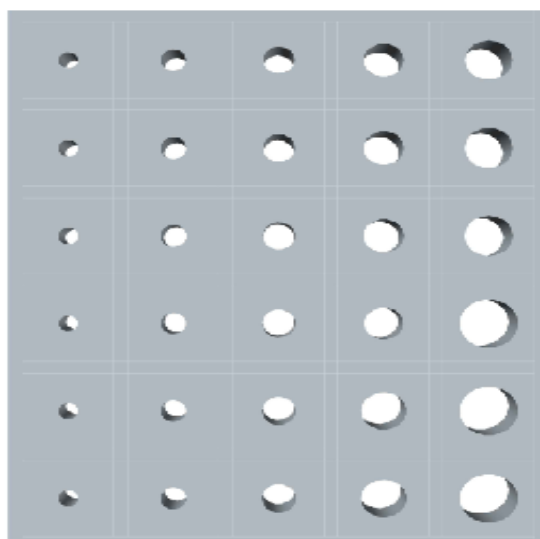
De lo anterior se realizó la modelación de los diferentes tipos de gotero mediante el programa de diseño AUTOCAD.



**Fig. 34** *Diseño del formador de gota*



**Fig. 35** . *Vista en perspectiva del formador de gota*



**Fig. 36** . Vista en perspectiva de la bandeja de formador.



**Fig. 37** Vista en perspectiva de la bandeja de distribución de gotas



**Fig. 38** Vista en alzada de la bandeja de distribución

### 5.2.6 DETERMINACION DEL DIAMETRO ÓPTIMO DE GOTA

Uno de los objetivos básicos de esta investigación, es la generación de una lluvia de diseño, para esto se ha determinado estudiar el diámetro optimo, a través del formador de gotas en acrílico. Los materiales y procesos utilizados se muestran a continuación:

#### 5.2.6.1 MATERIALES:

- Balanza de precisión: Para determinar la masa de las gotas se utilizó la balanza de precisión **Ohaus scout pro SP601, 600g X 0.1g**.
  - **Ficha técnica** la balanza de precisión **Ohaus scout pro SP601:**

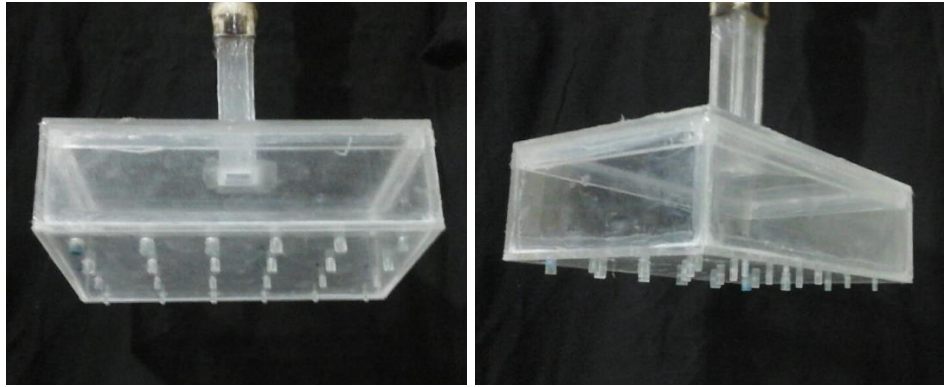
Specifications	
Calibration	External
Capacity (g)	600
Housing dimensions	19.1 x 5.4 x 21 cm
Dimensions (" W)	7.5
Dimensions (" H)	2-1/8
Dimensions (" D)	8-1/4
Pan size (dia)	4-3/4" (12.1 cm)
Readability (g)	0.1
Linearity (g)	±0.1
Repeatability (g)	±0.1
Weighing units	g, kg, oz, lb, lb:oz, t, dwt
Power (VAC)	230
Battery	4 AA batteries (not included)
Stability Indicator	Yes
Output	RS-232 / USB / auxiliary
Product Type	Portable Balance
Model	SP401-220V
Brand	Ohaus

**Fig. 39** Ficha técnica balanza de precisión

- PROBETA: Para pesar las gotas, se utilizó una probeta de vidrio, con forma elevada, orificio de descarga y base de seis lados.
  - Escala: 100 ml
  - División: 1 ml

#### 5.2.6.2 FORMADOR DE GOTAS EN ACRILÍCO:

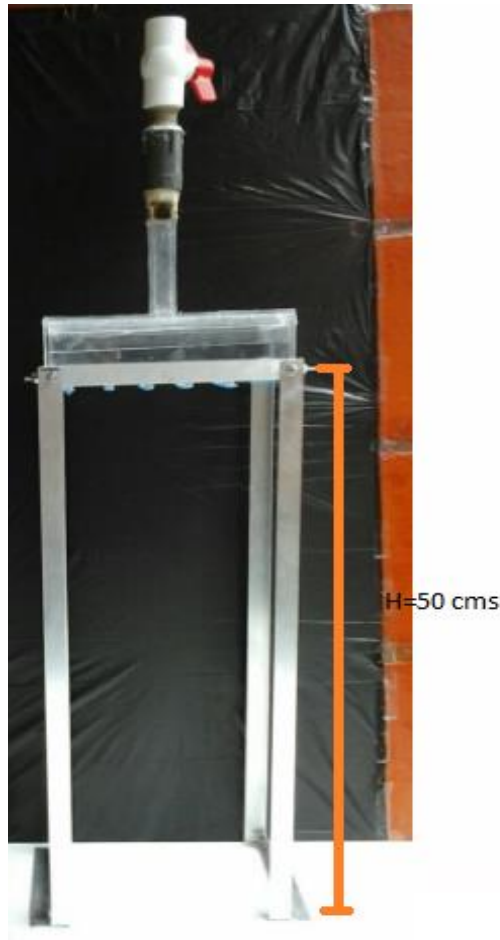
Para el proceso de formación de las gotas se utilizó el formador de gotas en acrílico, obtenido del proceso de diseño del diámetro de gotas (Tablas 23 y 24)



**Fig. 40** *Formador de gotas en acrílico*

#### **5.2.7 PROCEDIMIENTO:**

- Para el procesamiento de los datos primero se ha montado el formador de gotas en acrílico sobre una estructura de aluminio, de altura 50 centímetros (ver Fig. 41).
- Debido a que la columna de agua y el poco rozamiento que genera el acrílico con respecto al agua, generan un flujo continuo de agua, se optó por instalar una llave de control de presión, cuyo objetivo es controlar la salida de agua y así generar un flujo por goteo obteniendo un mejor control de las mediciones de masa (Ver fig.41).

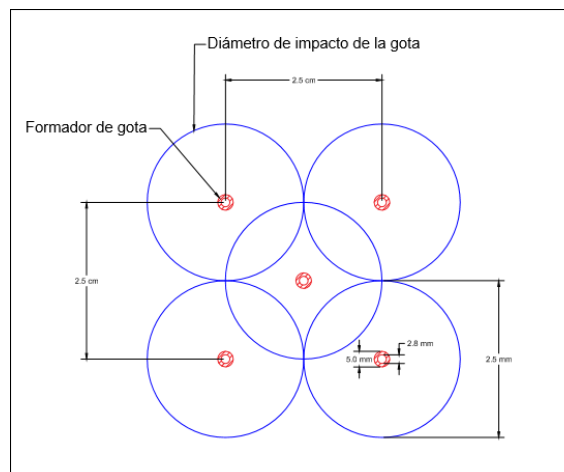


**Fig. 41** *Montaje experimental*

- Para el manejo de la columna de agua, se instalo un tubo de pvc, de diametro 1/2", esto con el fin de alimentar el flujo de agua hacia la bandeja de entrada.
- Como paso siguiente, se procede a tomar mediciones de cada orificio formador de gota, con mediciones de 100 gotas con 5 repeticiones para asi obtener una medicion exacta de la masa de cada gota.
- Para cada diametro, se define el peso de una gota, para asi obtener una comparación con el valor obtenido en la ecuacion 2 y 3 de la ley de TATE, como se ha obtenido un gran numero de datos, se aplica la media aritmetica, con esto se obtiene que valores estan por encima o por debajo del valor promedio y asi obtener una comparacion mas exacta con el peso teorico proporcionado con la ley de TATE, los datos anteriormente mencionados asi como el diametro de cada gota se presentan en Anexo 4.

### 5.2.8 RESULTADOS OBTENIDOS

- Del análisis anterior se pudo concluir que a través de la aplicación del método de la ley de TATE, se puede obtener un punto fiable de comparación en el diseño teórico y experimental de las propiedades de cada gota de diseño contenidas en la bandeja de acrílico.
- Al inicio del diseño se había obtenido que para una gota de lluvia para la ciudad de Santiago de Cali, el tamaño máximo de gota es de **5 mm**, es por esto que se analizaron principalmente los orificios contenidos en la segunda fila de la bandeja de formadores de gotas, de estos el que mejor se ajustó a los datos fue el orificio 2 el cual tiene como diámetro externo **D** igual a **5 mm** y diámetro interno **d** de **2,80 mm**, con este se procederá al diseño final del simulador de lluvia con el cual se hará el análisis de deslizamiento en el talud limo-arenoso (Fig. 42).
- El diseño de la bandeja para el simulador de lluvia se presenta en la figura siguiente en donde se muestra el formador escogido a través del análisis presentado anteriormente, además del **SPLASH** o impacto de gota el cual se definió de **2,5 mm**.



**Fig. 42 ESQUEMA FORMADOR DE GOTA**

### 5.3 MONTAJE EXPERIMENTAL

Con los resultados obtenidos del diametro de gota (fig. 42) se procede al diseño del simulador de lluvia, el cual se realizo de la siguiente manera:

#### 5.3.1 Material

Para el diseño del simulador se escogio como material base acrilico y utilizando una maquina de cortado por laser para su dimensionamiento, esto basado en un diseño previo, el cual presenta, la bandeja con la perforación de diametro escogido (Fig. 42), paredes laterales y una tapa que posee 5 orificios de entrada, obteniendo asi una caja tipo contenedor de agua.

#### 5.3.2 Instalación tubería

Con el diseño ya materializado se procedio a realizar la instalación de la tubería de conducción (Fig. 43), la cual consta de (Tabla 25).



**Fig. 43** *Instalación de la conducción*



<b>MATERIALES</b>	<b>CANTIDAD</b>
Tubo PVC verde $\phi=1/2''$ - Longitud L= 10 cms	5
Tubo PVC verde $\phi=1/2''$ - Longitud L= 30 cms	6
Tubo PVC blanco $\phi=1/2''$ - Longitud L= 15 cms	2
Codo PVC $\phi=1/2''$	8
Adaptadores PVC $\phi=1/2''$	5
Adaptador en T PVC $\phi=1/2''$	4
Llave de presión plastica	2
Adaptador de tubo a manguera	1

**Tabla 25** Materiales Utilizados

### 5.3.3 Balance de volúmenes

Los implementos de conducción se implementaron de esta forma tal que se cumpla un balance hídrico, el cual establece que el caudal de entrada y salida de agua estén casi sobre la misma magnitud, garantizando así que el flujo de agua sobre la caja contenedora no disminuya bruscamente al momento de generar una precipitación. (Tabla 26)

<b>VOLUMEN BANDEJA DE GOTEROS</b>	
Cantidad goteros	384
Volumen unitario (cm <sup>3</sup> )	0,065
Volumen total (cm <sup>3</sup> )	24,96
<b>VOLUMEN DE LA TUBERÍA</b>	
Diametro	1,27
Volumen unitario (cm <sup>3</sup> )	6,4516
Volumen total (cm <sup>3</sup> )	32,258

**Tabla 26** Volumen de entrada y salida de agua.

#### 5.3.4 Montaje

Con el montaje listo obtenemos así, el simulador de lluvia, con el cual se podrá proceder a realizar los estudios de precipitaciones, completando así una parte primordial de esta investigación (Fig. 44).



**Fig. 44** *Simulador de lluvia.*

### 5.3.5 Base de apoyo

Para la generación efectiva de la lluvia, se requiere una altura de caída de la lluvia a generar, es por esto que se construyó una estructura de perfiles en acero, los cuales sirven de apoyo al simulador de lluvia y al talud a construir, esto con el objetivo de formar un sistema homogéneo que sea de fácil manipulación y que cumpla con las características de diseño. Uno de los criterios base para determinar la altura es el diámetro de la lluvia a generar que en nuestro caso es de 5 mm, con ella se tiene que la velocidad que según LAWS (1941), corresponde a una velocidad de caída máxima de **5,50 m/seg**, esto correspondiente a una altura de caída de **1,50 m** medidos desde la base hasta la altura del formador de gota. De acuerdo a esto se realizó una estructura en perfiles de acero, la cual se compone de 4 perfiles verticales de altura 2 metros, 2 niveles compuestos de 2 perfiles de 0,8 metros y 2 perfiles de 1,0 metros, ambos horizontales, de tal manera que sirvan de base para el simulador y para el talud.(Fig. 45).



**Fig. 45** Estructura para el apoyo de talud y simulador

### 5.3.6 Parámetros de lluvia

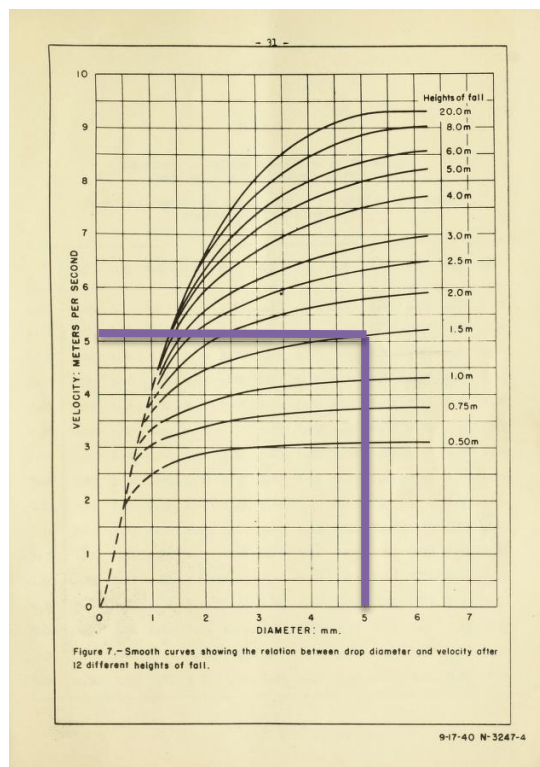
La lluvia simulada posee parámetros de diseño, los cuales se deben tener en cuenta de tal modo que se obtenga así valores aproximados o similares a los reales, para esto se tienen en cuenta propiedades como:

#### 5.3.6.1 Distribución del tamaño de gota

La caracterización de esta propiedad se hizo teniendo en cuenta e impacto que generaba la gota en cuanto tocaba el suelo obteniendo así un espaciamiento de 2,5 mm, es así que de acuerdo a la figura 46, se realizó un espaciamiento tal que se cubra en su totalidad la superficie a mojar.

#### 5.3.6.2 Velocidad de caída:

La velocidad de caída se calculó basándonos en Laws (1941), el cual toma en cuenta la altura de caída y el diámetro de gota despreciando la fricción con el aire, según esto la velocidad teórica sería **5,2 m/s** (Fig. 46)



**Fig. 46** Determinación de la velocidad terminal (Laws, 1941)

### 5.3.6.3 Energía cinética

Conociendo el diámetro de gota y la velocidad terminal de las gotas obtenemos la energía cinética la cual se expresa como:

$$EK = \frac{1}{2} m * v^2 \quad Ec. 5$$

De esto se tiene que **EK0,00087 J**, que corresponde a la energía cinética unitaria así que la energía cinética total de la lluvia a simular se la debe multiplicar por el número total de goteros presentes obtenidos de la tabla 26, de esto se presenta la siguiente tabla resumen de datos de diseño.

DATOS TEORICOS	
VELOCIDAD DE CAIDA (M/S)	5,2
ENERGIA CINETICA UNITARIA (J)	0,00087
ENERGIA CINETICA TOTAL (J)	0,337

**Tabla 27** Datos de diseño

Para garantizar una cantidad de lluvia continua y teniendo en cuenta el balance de volumen presentado en la tabla 26, se debe garantizar una alimentación continua hacia el simulador, para ello se opta entonces por un recipiente, el cual posee una capacidad de 30 galones, equivalente a 113 litros, esto generara una alimentación continua de agua sin interrupciones como lo podría presentar una alimentación de manguera .La conexión de este recipiente con el simulador se hace mediante un tubo de 2", una llave de paso plástica y dos codos de 45° y 90° respectivamente, esto debido a que el recipiente está a 2,5 metros, 0,5 metros más alto que el simulador, el montaje final se representa en la siguiente fotografía (Fig. 47)



**Fig. 47** Montaje y disposición final del experimento

## 6 RESULTADOS

Con el equipo instalado y en su lugar (Fig. 47), procedemos a desarrollar el experimento, con el fin de llevar un orden en la toma de ensayos procedimos dividiendo estos por capítulos así:

### 6.1 Determinación de velocidades experimentales:

Para este procedimiento se realizó tomando tiempos de caída de diferentes gotas a la altura comprendida entre la corona del talud y la base del simulador, escogidos arbitrariamente sobre toda el área de precipitación, con el objetivo de realizar un promedio de velocidad que sea representativo de todo el sistema, los datos obtenidos se resumen a continuación.

VELOCIDAD TERMINAL EXPERIMENTAL		
TIEMPO (seg)	ALTURA (m)	VELOCIDAD (m/seg)
0,225	1,16	5,156
0,215	1,16	5,395
0,23	1,16	5,043
0,22	1,16	5,273
0,215	1,16	5,395
VELOCIDAD PROMEDIO		5,252

**Tabla 28** Velocidad de caída experimental

Obtenemos entonces que la velocidad representativa del sistema con desviación estándar es de  $5,252 \pm 0,1534$  m/seg, velocidad que coincide con la velocidad teórica de 5,252 m/seg (Tabla 27)

### 6.2 Energía cinética del sistema

Conociendo previamente el diámetro de las gotas y su velocidad de caída se puede calcular la energía cinética para cada tamaño de gota.

ENERGIA CINETICA (EK) EXPERIMENTAL			
TIEMPO (seg)	ALTURA (m)	VELOCIDAD (m/seg)	EK (J)
0,225	1,16	5,156	0,000864
0,215	1,16	5,395	0,000946
0,23	1,16	5,043	0,000827
0,22	1,16	5,273	0,000904
0,215	1,16	5,395	0,000946
EK PROMEDIO		5,252	0,000897

**Tabla 29** *Energía cinética Unitaria experimental*

Donde se obtiene una energía cinética experimental con una desviación estándar de  $0,000897 \pm 5,2055 \cdot 10^{-5}$ . Posteriormente mediante la suma de las energías parciales se obtiene la energía total de la lluvia simulada. Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente tabla resumen.

DATOS EXPERIMENTALES	
VELOCIDAD DE CAIDA (M/S)	5,252
ENERGIA CINETICA UNITARIA (J)	0,000897
ENERGIA CINETICA TOTAL	0,3443066

**Tabla 30** *Resumen datos experimentales*

Con el objetivo de tener un punto de comparación con la base teórica, pudimos observar que los datos experimentales de energía cinética promedio de cada gotero y la energía cinética total de los goteros de la tabla 30 es similar a los datos obtenidos teóricamente en la tabla 27.

### 6.3 Determinación de Intensidad de Lluvia

Para el cálculo de intensidad de lluvia, se procedió a tomar mediciones de la cantidad de agua en intervalos de 5 segundos hasta 25 segundos, con esto se obtiene una masa de agua con la cual podemos encontrar la cantidad volumétrica y aplicar la ecuación de intensidad (Ec. 6)

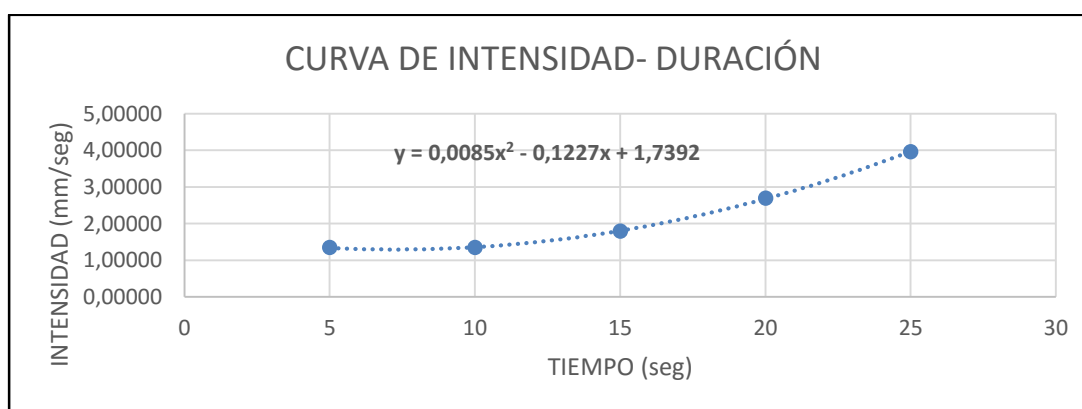
$$I \left[ \frac{mm}{min} \right] = \frac{Volumen\ agua\ captado\ (mm)}{Area\ de\ precipitación\ (mm^2) * Tiempo\ de\ precipitación\ (Seg)} \quad Ec. 6$$

Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente tabla resumen.

INTENSIDADES DE LLUVIA					
TIEMPO (SEG)	CANTIDAD (gr)	AREA PRECIPITACIÓN (m2)	VOLUMEN (litros)	volumen (m3)	I (mm/min)
0	0	0,24	0	0	0
5	1613,5	0,24	1,6135	0,00161	1,34458
10	3234,5	0,24	3,23454	0,00323	1,34773
15	6473	0,24	6,473	0,00647	1,79806
20	12946	0,24	12,946	0,01295	2,69708
25	23756	0,24	23,756	0,02376	3,95933

**Tabla 31** Resumen Intensidades experimentales

Finalmente se obtuvo la representación gráfica de la curva Intensidad – Duración, representativa del sistema de lluvia simulado.



**Fig. 48** Curva Intensidad – Duración

#### 6.4 Medición de pérdida de suelo o erosión:

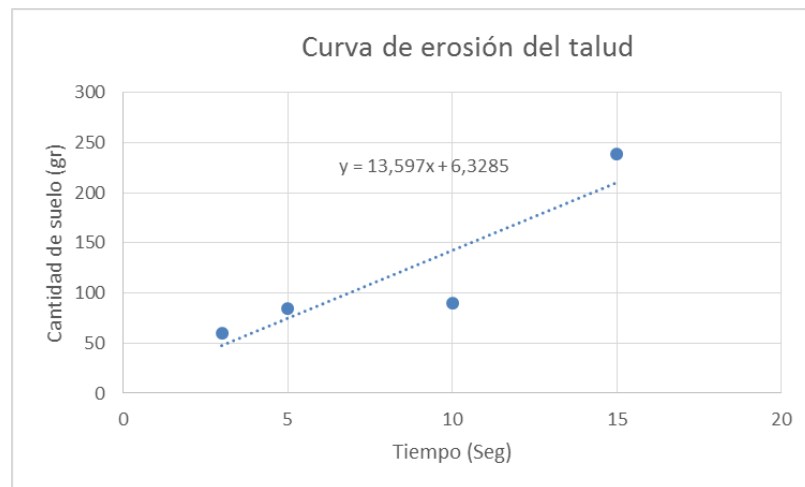
Durante la puesta en marcha del simulador, el impacto de la gota y la energía cinética EK, tienden a erosionar el talud, fenómeno por el cual el talud, sufre una pérdida de material por escurrimiento, con el objetivo de realizar la medición de la pérdida de suelo que se presenta en el experimento, se tomaron muestras de escurrimiento, para luego determinar la cantidad de suelo perdido, los datos tomados se presentan a continuación.

Tiempo (Seg)	Nº Recipiente	Peso recipiente (gr)	Peso recipiente + Muestra húmeda (gr)	Peso de recipiente + Muestra seca (gr)
3	81	59	87	60
5	84	63	318	85
10	82	62	335	90
15	5	162	1059	239

**Tabla 32** Resumen datos perdida de suelo



De lo anterior se tiene la representación gráfica de la pérdida de suelos en gramos respecto a los intervalos de tiempo de precipitación.



**Fig. 49** Curva perdida de suelo en el talud

Con el objetivo de establecer correlaciones de tiempo para la pérdida de suelo se obtiene la ecuación de erodabilidad a partir de los datos experimentales la cual nos servirá para determinar la pérdida de suelo en cualquier intervalo de tiempo a estudiar. Para determinar en un intervalo de tiempo mayor la perdida de suelo teorica y experimentalmente, sometimos al talud a una precipitación con duración de 25 minutos (Fig. 50)



**Fig. 50** Talud después de 25 minutos de lluvia

Durante los cuales se obtuvo una masa de suelo final que se pesó y se puso a secar en horno a 105° centígrados por 24 horas, los resultados se presentan a continuación:

	Peso (gr)	Bandeja + Material humedo (gr)	Bandeja + Material Seco (gr)
<b>Bandeja 1</b>	6,91	10000	9560
<b>bandeja 2</b>	6,85	10473	10242

**Tabla 33 Suelo final**

Establecemos que el suelo total perdido experimentalmente M1 por escurrimiento después de 30 minutos de lluvia es M1= 19,802 kilogramos.

Teóricamente y con la ecuación de pérdida de suelo (Ec 6), se puede establecer que el suelo perdido durante los 30 minutos de lluvia es:

$$y = 13,597x + 6,3285 \text{ Ec. 6}$$

Remplazando en la ecuación Ec.6 los 30 minutos de lluvia obtenemos que:

$$y = 13,597(1800 \text{ seg}) + 6,3285$$

$$y = 24,481 \text{ kls}$$

De lo anterior se puede observar que los datos teóricos y experimentales no están en su gran medida separados, pudiendo establecer así una correlación teórico-experimental de la perdida de suelos.

### **6.5 Ensayos de corte pruebas finales:**

Para poder determinar las condiciones finales del talud, se determinó un ensayo de corte no consolidado no drenado de 3 muestras del talud tomadas a una altura de 10 centímetros respecto de la base del talud, hasta llegar a los 30 centímetros, esto con el fin de conocer el cambio de las propiedades intrínsecas del material sometido a precipitaciones. Las muestras se tomaron a diferentes alturas con el propósito de determinar los cambios con respecto a la infiltración que se daba en el talud después de la precipitación (Fig.49)



**Fig. 51** Toma de muestras para ensayo de corte

Los resultados de esta prueba se presentan en la siguiente tabla resumen

	COHESIÓN (Kg/cm <sup>2</sup> )	ANGULO DE FRICCIÓN °
TALUD	0,1622	33

**Tabla 34** Parámetros de resistencia a corte finales..

Donde se puede observar un cambio en los valores de cohesión inicial de 0.2183 kg/cm<sup>2</sup> y Angulo de fricción inicial de 32°, esto debido a los cambios de humedad de la muestra.

## 7 CONCLUSIONES

- La hipótesis básica del modelo que se planteó con la construcción del simulador de lluvia es una propuesta novedosa, con relación a otras técnicas del proceso de estudio de la interacción suelo-lluvia, ya que a través de este, se puede estudiar los procesos de lluvia natural, con procesos de goteo naturales, es decir sin la utilización de presiones de salida solamente teniendo en cuenta el peso de la gota y la gravedad
- A través del análisis de los parámetros que influyen en un talud sometido a precipitaciones se puede observar que a medida que la intensidad aumenta, las afectaciones físicas a este aumentan, hasta llegar a generar inestabilidad y por ende pérdida de material del mismo, lo que causa un deslizamiento proporcional a la intensidad de lluvia.
- En la puesta en marcha del simulador de lluvia se evidencia como a partir del aumento de la intensidad de la lluvia, la cantidad de suelo perdido, por los fenómenos de impacto causado por la energía cinética y el fenómeno de erosión, la pérdida de suelo se hace cada vez mayor a medida que pasa el tiempo esto se puede evidenciar en la figura 47, donde se presenta una recta cuya ecuación describe la pérdida lineal del suelo con respecto al tiempo.
- Con el objetivo de establecer correlaciones de la parte experimental y teórica del trabajo, se obtuvo una comparación entre la pérdida de suelo teórica dado por la ecuación de la figura 47 y los resultados expuestos en la tabla 33 del suelo, cuyo análisis puede confirmar la cercana relación de masas finales que se obtuvieron en los 25 minutos de precipitación que se generaron en el talud experimental, dando lugar así a una comparación fiable de nuestro modelo.
- Se pudo evidenciar una alta sensibilidad a el empuje del aire, la gravedad y la presión de agua, durante el proceso de generación de

lluvia, lo cual se confirmó al momento de llenar el contenedor de agua y generar presión neutra al interior, motivo por el cual se incluyó tapones de alambre en los orificios de salida, obteniendo así una salida nula de agua hasta llenar el contenedor y solo contar con la presión del agua.

- De los parámetros intrínsecos (ángulo de fricción interno y cohesión) del talud se pudo observar que la precipitación, produjo una reducción de la cohesión debido al aumento de la presión de poro; dicha reducción se debió a que la lluvia produjo un lavado del suelo fino que conformaba el talud de tal manera que el esqueleto mineral resultante en la muestra de corte después de la prueba predominó un porcentaje de material arenoso superior al que tenía al inicio de la prueba de lluvia.
- Las afectaciones visibles que se evidenciaron en el talud experimental se dan principalmente por la energía cinética de las gotas obtenida en la tabla 29, ya que al caer de una gran altura la velocidad que adquiere y su respectivo impacto fue destructivo, lo cual no se consideró en detalle para el diseño de la altura de la lluvia, provocando así una erosión en cuestión de minutos del talud.
- El comportamiento mecánico del talud no fue el esperado debido a que el poder de la energía de la gota no fue contemplado durante la etapa de documentación y el diseño del simulador, sino que esta energía se pudo evidenciar cuando se empezó con la precipitación.

## 8 RECOMENDACIONES

- En la investigación llevada a cabo, se evidenciaron posibles aspectos a tener en cuenta, uno de los más importantes es la energía cinética de las partículas, ya que este fenómeno es el responsable del poder erosivo de las partículas, es por esto que se debe recomendar para una futura investigación tener en cuenta este parámetro, con el objetivo de tener un mayor tiempo de análisis.
- Una tentativa línea de investigación, para la cual se puede enlazar este proyecto es en agricultura, ya que en esta área es importante conocer el efecto que la lluvia tiene sobre el suelo sobre todo en la pérdida del suelo y la escorrentía que se genera, pudiendo analizar así la conformación del terreno para evitar la pérdida de los cultivos.
- Los resultados obtenidos en el presente trabajo, demuestran que se pueden obtener correlaciones en cuanto a la interacción lluvia-suelo, una posible ampliación de estas correlaciones es experimentar con un talud bien sea con vegetación o con diferentes estratos, ya que esto se asemejaría aún más a la realidad de un terreno expuesto a lluvia y se podría correlacionar este fenómeno experimental con el teórico.

## 9 BIBLIOGRAFIA

**Brabb E.E., Hrod B.L.** "Landslides: Extent and economic significance": Proc., 28th International Geological Congress: Symposium on landslides, A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1989, 385 p.

**BRAND, E.W.** Predicting the performance of residual soil slopes. Proceedings of the eleventh international conference on soil mechanics and foundation engineering, San Francisco, 12-16 August, 1985. Volume 5, pp 2541-2578.

**BUBENZER, G.D.** 1979. Rainfall characteristics important for simulation: Proceeding of the Rainfall Simulator Workshop. Tucson, Arizona. Department of Agriculture Science and Education Administration Agricultural Reviews and Manuals. ARM-W-10. Julio 1979. H.22-35

**BURBANO, S.; BURBANO, E; MUÑOZ, C.** (2001). Física general. 32ª edición. 298

**BURGOS G. Anibal.** Factores de la Erosión de los Suelos. 1996. Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira, Departamento de Ingeniería.

**OSSO, U. EAFIT, LA RED** (2011) Inventario histórico de pérdidas de Colombia 1914-2010.

**Cho S.E., Lee S.R.** Instability of Unsaturated Soil Slopes Due to Infiltration. *Computers and Geotechnics*, 28:185-208. 2001.

**Cho S.E., Lee S.R.** Evaluation of Surficial Stability for Homogeneous Slopes Considering Rainfall Characteristics. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128(9):756-763. 2002.

**Gastón García Sosa; Juan F. Weber.** Análisis de Formadores de Gota para un Microsimulador de Lluvia de Baja Intensidad. Laboratorio de Hidráulica-Depto. de Ingeniería Civil. Facultad Regional Córdoba-Universidad Tecnológica Nacional Maestro M. López esq. Cruz Roja Argentina- Ciudad Universitaria, CP (X5016ZAA). Córdoba, Argentina. 2.005, 2 h.

**Harkins William D., E. C. Humphery** (1916).The drop weight method for the determination of surface tensión; pp 228–236

**Irurtia, C. B. y R. Mon,** 1994. Microsimulador de lluvia para determinar infiltración a campo. Publicación N° 176:1-18 . Instituto de suelos INTA-Castelar. Buenos Aires, Argentina.

**IVERSON R. M.; REID M. E.; IVERSON N. R.; LAHUSEN R. G; LOGAN M, MANN J. E; BRIEN D. L.** (2000). Acute sensitivity of landslide rates to initial soil porosity.

Science, 290(5491); 513-516.

**HERNANDEZ A.Y.** Caracterización y análisis de la amenaza y vulnerabilidad física por taludes y laderas inestables en la microcuenca de la quebrada cay, Ibagué, departamento del Tolima. Ibagué. 2013, 59 h. Trabajo de grado (Magíster en Planificación y Manejo Ambiental de Cuencas Hidrográficas). Universidad del Tolima. Facultad de ingeniería forestal.

INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTIN CODAZZI (**IGAC**), Suelos y bosques de Colombia, Subdirección agrícola IGAC, Bogotá, Colombia, 1988 (sin autor).

**KENT, M.** Mecanismos de la erosión del suelo. Universidad de Illinois. Revista Agricultura de las Américas. 1983, Pág. 40.

**KIRKBY, M. J. & MORGAN, R. P. C.**, Erosión de suelos, Editorial Limusa S. A., México, D. F., 1984.

**LAL, R.; KIMBLE, J.; STEWART, B. A.** "World soils a source or sink for radioactively active gases" En: LAL, R., KIMBLE, J., LEVINE, E., STEWART, B. A. *Soil management and greenhouse effect*, Lewis publisher, Florida, USA, 1995.

**LAWS, J.O.** (1941). Measurements of the fall velocity of water drops and raindrops. Transactions of the American Geophysical Union, 22: 709-721.

**Leoni, Augusto.** Relaciones volumétricas y gravimétricas. Internet: (<http://www.ing.unlp.edu.ar/constr/g1/RELACIONES%20VOLUMETRICAS%20Y%20GRAVIMETRICAS%20Leoni.pdf>).

**Lozano, J. (2000).** Determinación de índices de pérdida de suelo en zonas degradadas por ganadería extensiva en la cuenca de Aguamona haciendo uso del simulador de lluvia, CVC. 130 p.

**MANTILLA, G.; A.** (2001). Los suelos: estabilidad, productividad y degradación. In: LEIVA, P. El medio ambiente en Colombia. IDEAM Bogotá, 2° edición. pp 228 – 277.

**Marelli H. J.** La Erosión Hídrica. *Proyecto: Alternativas Mejoradas Conservacionistas de Producción Agrícola Ganadera en el Sur de Córdoba*. Publicación técnica N°1. INTA, Estación Experimental Agropecuaria Marco Juárez, Córdoba, Argentina, 1989.

**MEYER, L. D.**, "Rainfall simulators for soil conservation research", En: LAL, R., Soil erosion research methods, Soil and water conservation, Iowa, U. S. A., 1988.

**MONTENEGRO G., H., MALAGÓN C., D.**, *Propiedades físicas de los suelos*, Subdirección agrícola IGAC, Bogotá, Colombia, 1990.

**MORA ORTIZ, R; ROJAS GONZÁLES, E.** Efecto de la saturación en el deslizamiento



de talud en la comunidad de San Juan de Grijalva, Chiapas, México: Ingeniería Investigación y Tecnología. Vol. XIII, Núm. 1, 2012, 55-68 (febrero; 2011); ISSN 1405-7743 FI-UNAM.

**MORGAN, R. P. C.** (b), "Modeling soil erosion" En: *Soil erosion and conservation*, John Wiley & Sons, New York. 1986, Cap. 5.

**Paoli, Héctor I.** *Simulador de lluvia portátil para la determinación in situ de parámetros hidrológicos*. Informe técnico - Laboratorio de Hidráulica, Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Córdoba, 2009.

**Pla Sentis, I.** Simuladores de Lluvia Para el Estudio de Relaciones Suelo Agua Bajo Agricultura de Secano en los Trópicos. Maracay, Venezuela, 1981. Rev. Fac. Agron. 12 (1-2): 81-9

**QUINTERO, L; AMEZQUITA, E.** Diseño, construcción y evaluación de un minisimulador de lluvia para estudios de susceptibilidad a erosión en laderas. Cali (Colombia). 3 p

**ROSE, C. W.**, "Research progress on soil erosion processes and a basis for soil conservation practices", En: *Soil erosion research methods*, LAL, R., Soil and water conservation, Iowa, U. S. A., 1988.

**Rostagno, C.M., Garayzar, D.** Diseño de un Simulador de Lluvia para Estudios de Infiltración y Erosión de Suelos. *Ciencia del Suelo*, 13, 41 – 43, 1995.

**SALAZAR G, Luis.** Determinación de la humedad del suelo para inicio de movimientos en masa en la región cafetera colombiana con el uso de modelos físicos experimentales. Medellín, 2011, 33 h. Trabajo de grado (Magister en Ingeniería geotécnica). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de minas. Escuela de Ingeniería civil.

**SAMANN, K. M.**, "Clasificación y estudio de la erodabilidad de los suelos andinos en el sur occidente colombiano", En: *Conservación de suelos y aguas en la zona andina*. Centro internacional de agricultura tropical, Palmira, Colombia. Cap. 5, p 41 - 46.

**SÁNCHEZ T., E.; AHMED, K.; AWE, Y.** (2006). Prioridades ambientales para la reducción de la pobreza en Colombia: un análisis ambiental del país para Colombia. Bogotá (Colombia), Banco Mundial – Mayo I Ediciones. 501 p.

**SANCHEZ, E; URREGO, L.** Metodología para la Evaluación de Riesgo en Corredores Viales. Bogotá (Colombia). 2011, 11h. Trabajo de grado (Magister en Ingeniería civil). Pontifica universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería.

**SCHWAB G.; Kenneth K. B.; Frevert R. K.; y Edminister T.W.** En: Manual de

Conservación del Suelo y del Agua. 1977. Colegio de Graduados. Chapingo, México.

**SMITH D.D. y W. H. Wischmeier.** En: Manual de Conservación del Suelo y del Agua. 1977. Colegio de Graduados. Chapingo, México.

**Suarez D.J.**1998. Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales, Bucaramanga, Colombia, 1989, 233 p.

**SUAREZ F.** Conservación de Suelos. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas IICA. San José, Costa Rica. 1979.

**TORRES P, Enrique.** Evaluación de la susceptibilidad a la erosión y de las características asociadas (infiltración y escorrentía) de dos suelos de ladera en el Departamento del Cauca, mediante un minisimulador de lluvia. Santiago de Cali. 2000, 21 h. Trabajo de grado (Ingeniero agrícola). Universidad nacional sede Palmira.

## 10 ANEXOS

### A. 1 DATOS DE CORTE

- Datos de mezcla 60-40

Resumen de los datos obtenidos Mezcla 60-40						
ESF NORMAL	1,00	1,50	2,00	1,00	1,50	2,00
DEFORMACION	ESFUERZO	ESFUERZO	ESFUERZO	DEF. VERTICAL	DEF. VERTICAL	DEF. VERTICAL
cm.	CORTANTE	CORTANTE	CORTANTE			
	Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>	0,01 mm	0,01 mm	0,01 mm
0,000	0,00000	0,00000	0,00000	0	0	0
-0,023	0,07049	0,11455	0,10133	-1	1	0
-0,046	0,28526	0,26093	0,25430	-6	-2	-1
-0,069	0,45506	0,31965	0,41511	-15	-6	-5
-0,091	0,56156	0,35654	0,49693	-24	-9	-12
-0,114	0,63756	0,40043	0,52571	-32	-13	-18
-0,137	0,71191	0,43119	0,64229	-38	-16	-24
-0,160	0,77557	0,46444	0,68990	-44	-20	-29
-0,183	0,83294	0,47985	0,73788	-48	-23	-33
-0,206	0,88395	0,49992	0,78624	-51	-26	-38
-0,229	0,93080	0,52243	0,86236	-53	-28	-42
-0,251	0,96198	0,54512	0,87037	-55	-30	-46
-0,274	0,98422	0,55650	0,92673	-56	-33	-48
-0,297	1,03203	0,57720	0,96277	-58	-36	-51
-0,320	1,09646	0,59575	0,98055	-59	-37	-53
-0,343	1,12416	0,60747	1,01012	-60	-39	-56
-0,366	1,16611	0,61694	1,06563	-60	-41	-59
-0,389	1,19198	0,62884	1,14740	-61	-43	-62
-0,411	1,22513	0,63848	1,17801	-63	-44	-64
-0,434	1,25382	0,64584	1,21360	-65	-46	-66
-0,457	1,27087	0,65563	1,25662	-65	-48	-68
-0,480	1,31191	0,66788	1,29760	-67	-49	-70
-0,503	1,34371	0,70898	1,35808	-67	-50	-72
-0,526	1,39262	0,72637	1,37097	-69	-51	-75
-0,549	1,41537	0,74391	1,41053	-70	-52	-77
-0,572	1,44073	0,76402	1,42618	-71	-52	-78
-0,594	1,46387	0,79405	1,43464	-71	-52	-80
-0,617	1,47987	0,81210	1,46642	-71	-52	-82
$\tau_{max}$	0,81	1,44	1,48			

- Datos de mezcla 70-30

Resumen de los datos obtenidos						
ESF NORMAL	1,00	1,50	2,00	1,00	1,50	2,00
DEFORMACION	ESFUERZO CORTANTE	ESFUERZO CORTANTE	ESFUERZO CORTANTE	DEF. VERTICAL	DEF. VERTICAL	DEF. VERTICAL
cm.	Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>	0,01 mm	0,01 mm	0,01 mm
0,000	0,00	0,00	0,00	0	0	0
-0,023	0,19	0,20	0,21	-1	1	0
-0,046	0,32	0,36	0,43	-6	-2	-1
-0,069	0,42	0,52	0,60	-15	-6	-5
-0,091	0,49	0,62	0,70	-24	-9	-12
-0,114	0,54	0,71	0,79	-32	-13	-18
-0,137	0,60	0,77	0,86	-38	-16	-24
-0,160	0,64	0,81	0,92	-44	-20	-29
-0,183	0,67	0,85	0,98	-48	-23	-33
-0,206	0,69	0,89	1,01	-51	-26	-38
-0,229	0,70	0,91	1,04	-53	-28	-42
-0,251	0,71	0,92	1,09	-55	-30	-46
-0,274	0,72	0,94	1,13	-56	-33	-48
-0,297	0,74	0,96	1,16	-58	-36	-51
-0,320	0,74	0,98	1,19	-59	-37	-53
-0,343	0,75	0,99	1,22	-60	-39	-56
-0,366	0,76	1,01	1,24	-60	-41	-59
-0,389	0,77	1,03	1,26	-61	-43	-62
-0,411	0,77	1,04	1,30	-63	-44	-64
-0,434	0,77	1,07	1,31	-65	-46	-66
-0,457	0,78	1,08	1,33	-65	-48	-68
-0,480	0,80	1,09	1,35	-67	-49	-70
-0,503	0,81	1,11	1,38	-67	-50	-72
-0,526	0,82	1,12	1,40	-69	-51	-75
-0,549	0,83	1,13	1,43	-70	-52	-77
-0,572	0,84	1,14	1,44	-71	-52	-78
-0,594	0,84	1,15	1,46	-71	-52	-80
-0,617	0,85	1,16	1,47	-71	-52	-82
-0,640	0,86	1,16	1,49	-72	-53	-83
-0,663	0,86	1,17	1,50	-72	-53	-84
-0,686	0,86	1,17	1,51	-73	-54	-85
-0,709	0,85	1,18	1,52	-74	-55	-86
-0,732	0,85	1,18	1,53	-74	-55	-86
-0,754	0,85	1,18	1,54	-74	-56	-87
$\tau_{max}$	0,84	1,18	1,47			

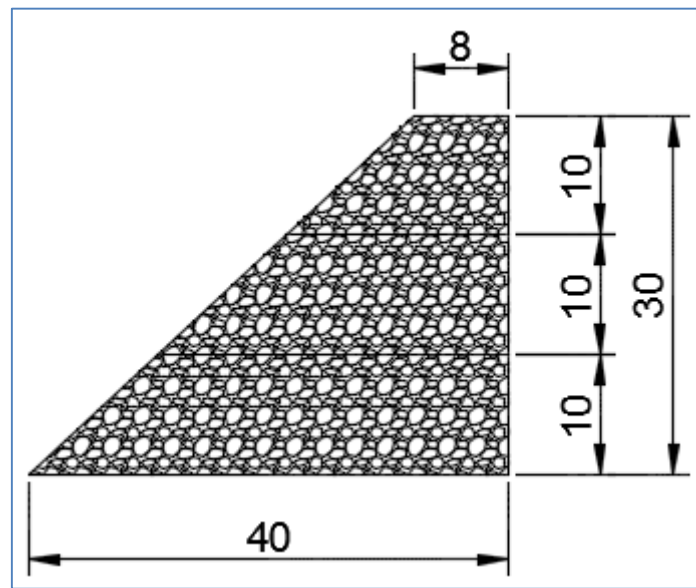
- Datos de mezcla 80-20

Resumen de los datos obtenidos						
ESF NORMAL	1,00	1,50	2,00	1,00	1,50	2,00
DEFORMACION	ESFUERZO CORTANTE	ESFUERZO CORTANTE	ESFUERZO CORTANTE	DEF. VERTICAL	DEF. VERTICAL	DEF. VERTICAL
cm.	Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>	0,01 mm	0,01 mm	0,01 mm
0,000	0,00000	0,00000	0,0000	0	0	0
-0,023	0,11895	0,17182	0,1410	-1	1	0
-0,046	0,16806	0,44226	0,3162	-6	-2	-1
-0,069	0,21310	0,53276	0,4262	-15	-6	-5
-0,091	0,24958	0,59053	0,4947	-24	-9	-12
-0,114	0,26845	0,64204	0,5503	-32	-13	-18
-0,137	0,28746	0,68272	0,6064	-38	-16	-24
-0,160	0,31113	0,73274	0,6606	-44	-20	-29
-0,183	0,33046	0,78768	0,7130	-48	-23	-33
-0,206	0,34313	0,81805	0,7453	-51	-26	-38
-0,229	0,35589	0,85323	0,7802	-53	-28	-42
-0,251	0,37105	0,87495	0,8246	-55	-30	-46
-0,274	0,38633	0,89914	0,8554	-56	-33	-48
-0,297	0,40404	0,92121	0,8820	-58	-36	-51
-0,320	0,42189	0,94346	0,9110	-59	-37	-53
-0,343	0,43989	0,96590	0,9333	-60	-39	-56
-0,366	0,45336	0,98851	0,9651	-60	-41	-59
-0,389	0,48102	1,01131	0,9972	-61	-43	-62
-0,411	0,49476	1,03194	1,0178	-63	-44	-64
-0,434	0,50626	1,03854	1,0409	-65	-46	-66
-0,457	0,52022	1,05708	1,0690	-65	-48	-68
-0,480	0,53908	1,06145	1,0972	-67	-49	-70
-0,503	0,55569	1,07545	1,1257	-67	-50	-72
-0,526	0,57004	1,08716	1,1353	-69	-51	-75
-0,549	0,58933	1,10621	1,1545	-70	-52	-77
-0,572	0,60152	1,11087	1,1642	-71	-52	-78
-0,594	0,60893	1,13018	1,1643	-71	-52	-80
-0,617	0,62130	1,14476	1,1668	-71	-52	-82
-0,640	0,62887	1,15947	1,1742	-72	-53	-83
-0,663	0,63649	1,17924	1,1866	-72	-53	-84
$\tau_{max}$	1,242	2,26	2,34			

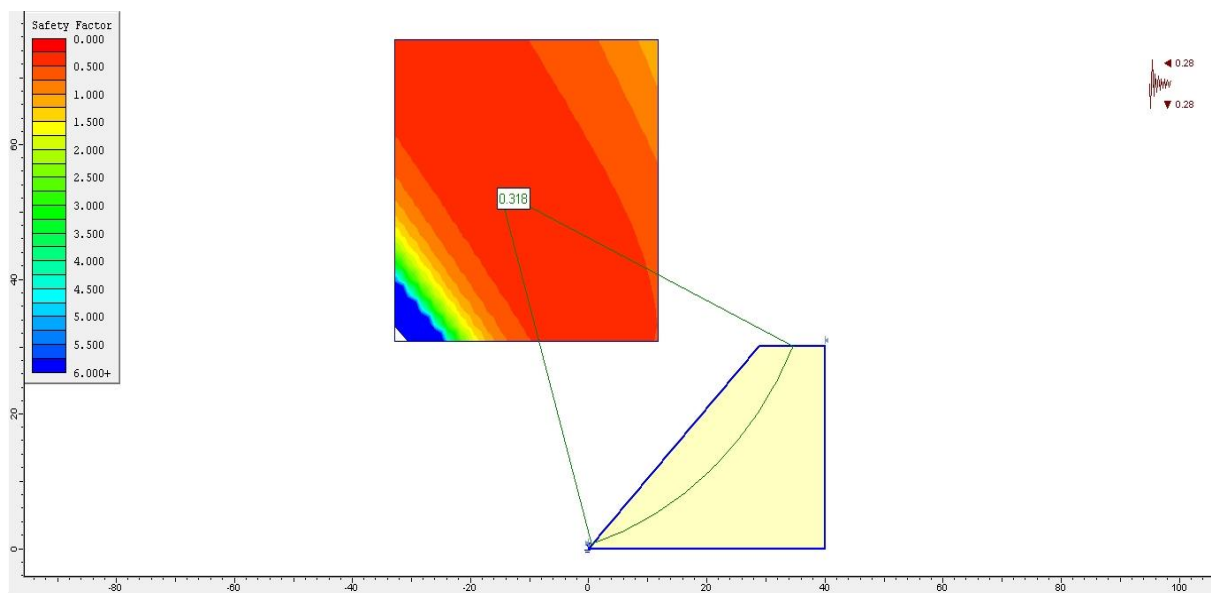
- Datos mezcla 90-10

Resumen de los datos obtenidos						
ESF NORMAL	1,00	1,50	2,00	1,00	1,50	2,00
DEFORMACION	ESFUERZO CORTANTE	ESFUERZO CORTANTE	ESFUERZO CORTANTE	DEF. VERTICAL	DEF. VERTICAL	DEF. VERTICAL
cm.	Kg/cm 2	Kg/cm 2	Kg/cm 2	0,01 mm	0,01 mm	0,01 mm
0,000	0,00000	0,00000	0,00000	0	0	0
-0,023	0,00004	0,00043	0,00031	-1	1	0
-0,046	0,00014	0,00070	0,00067	-6	-2	-1
-0,069	0,00019	0,00087	0,00092	-15	-6	-5
-0,091	0,00028	0,00099	0,00113	-24	-9	-12
-0,114	0,00032	0,00112	0,00132	-32	-13	-18
-0,137	0,00038	0,00126	0,00153	-38	-16	-24
-0,160	0,00039	0,00135	0,00165	-44	-20	-29
-0,183	0,00047	0,00145	0,00182	-48	-23	-33
-0,206	0,00053	0,00152	0,00194	-51	-26	-38
-0,229	0,00056	0,00157	0,00205	-53	-28	-42
-0,251	0,00059	0,00163	0,00218	-55	-30	-46
-0,274	0,00061	0,00169	0,00228	-56	-33	-48
-0,297	0,00065	0,00176	0,00238	-58	-36	-51
-0,320	0,00068	0,00181	0,00248	-59	-37	-53
-0,343	0,00071	0,00185	0,00257	-60	-39	-56
-0,366	0,00072	0,00189	0,00264	-60	-41	-59
-0,389	0,00074	0,00194	0,00272	-61	-43	-62
-0,411	0,00077	0,00197	0,00281	-63	-44	-64
-0,434	0,00078	0,00201	0,00288	-65	-46	-66
-0,457	0,00080	0,00204	0,00295	-65	-48	-68
-0,480	0,00081	0,00207	0,00300	-67	-49	-70
-0,503	0,00082	0,00209	0,00305	-67	-50	-72
-0,526	0,00083	0,00212	0,00310	-69	-51	-75
-0,549	0,00083	0,00213	0,00315	-70	-52	-77
-0,572	0,00084	0,00214	0,00318	-71	-52	-78
-0,594	0,00085	0,00215	0,00323	-71	-52	-80
-0,617	0,00086	0,00216	0,00328	-71	-52	-82
-0,640	0,00086	0,00217	0,00331	-72	-53	-83
-0,663	0,00087	0,00218	0,00333	-72	-53	-84
-0,686	0,00086	0,00219	0,00333	-73	-54	-85
-0,709	0,00085	0,00220	0,00333	-74	-55	-86
-0,732	0,00084	0,00222	0,00332	-74	-55	-86
-0,754	0,00083	0,00223		-74	-56	
$\tau_{max}$	0,0008	0,0020	0,0030			

## A. 2 ESQUEMA DE TALUD



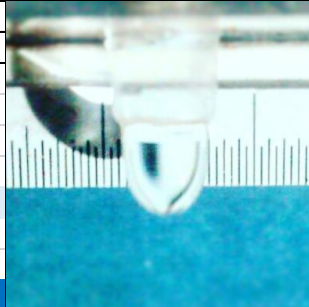
## A. 3 FACTOR DE SEGURIDAD DEL TALUD



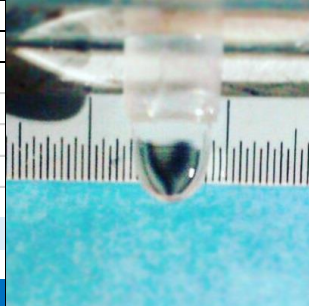
## A. 4 DATOS DE LOS DISTINTOS ORIFICIOS DEL FORMADOR DE GOTA

1. Datos teóricos y prácticos de cada orificio de la fila 1 del formador de gotas:

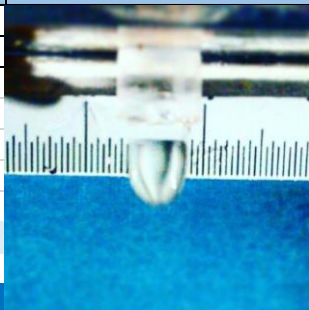
FILA 1 SIN FC			Tamaño diametro de gota	
Valores obtenidos de gota			Valores teóricos	
DIAMETROS (mm)	100 gotas (gr)	1 gota (gr)	Diametro (mm)	Diferencia (mm)
	11,63	0,116	6	0
	11,45	0,115	Peso (gr)	Diferencia (gr)
Externo	11,43	0,114	0,113	-0,002
6	11,35	0,114		
Interno	11,5	0,115		
4,95	Promedio	0,115		
	$\sigma$	0,093%		
	P 1 gota ajustado	0,115		



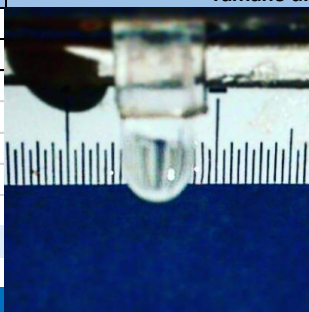
FILA 1 SIN FC			Tamaño diametro de gota	
Valores obtenidos de gota			Valores teóricos	
DIAMETROS (mm)	100 gotas (gr)	1 gota (gr)	Diametro (mm)	Diferencia (mm)
	10,86	0,109	5,9	0,1
	11,08	0,111	Peso (gr)	Diferencia (gr)
Externo	11,34	0,113	0,113	0,000
6	11,77	0,118		
Interno	11,8	0,118		
4,85	Promedio	0,114		
	$\sigma$	0,371%		
	P 1 gota ajustado	0,113		



FILA 1 SIN FC			Tamaño diametro de gota	
Valores obtenidos de gota			Valores teóricos	
DIAMETROS (mm)	100 gotas (gr)	1 gota (gr)	Diametro (mm)	Diferencia (mm)
	11,02	0,110	5	1
	10,75	0,108	Peso (gr)	Diferencia (gr)
Externo	11,37	0,114	0,113	0,004
6	10,08	0,101		
Interno	11,84	0,118		
4,75	Promedio	0,110		
	$\sigma$	0,592%		
	P 1 gota ajustado	0,109		

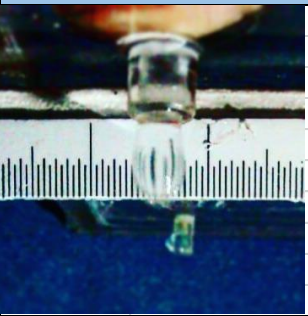


FILA 1 CON FC			Tamaño diametro de gota	
Valores obtenidos de gota			Valores teóricos	
DIAMETROS (mm)	100 gotas (gr)	1 gota (gr)	Diametro (mm)	Diferencia (mm)
	7,89	0,079	5	1
	7,94	0,079	Peso (gr)	Diferencia (gr)
Externo	7,78	0,078	0,056	-0,023
6	7,98	0,080		
Interno	8,04	0,080		
2,53	Promedio	0,079		
	$\sigma$	0,088%		
	P 1 gota ajustado	0,079		

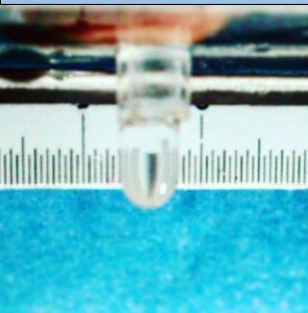




FILA 1 CON FC			Tamaño diametro de gota	
Valores obtenidos de gota			Valores teóricos	
DIAMETROS (mm)	100 gotas (gr)	1 gota (gr)	Diametro (mm)	Diferencia (mm)
	7,25	0,073	4,5	1,5
	7,28	0,073		
Externo	7,53	0,075	Peso (gr)	Diferencia (gr)
6	7,46	0,075	0,056	0,018
Interno	7,38	0,074		
2,43	Promedio	0,074		
	$\sigma$	0,001		
	P 1 gota ajustado	0,074		

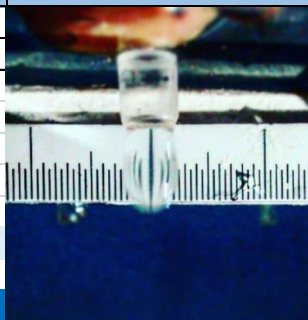


FILA 1 CON FC			Tamaño diametro de gota	
Valores obtenidos de gota			Valores teóricos	
DIAMETROS (mm)	100 gotas (gr)	1 gota (gr)	Diametro (mm)	Diferencia (mm)
	6,82	0,068	5,3	0,7
	6,56	0,066		
Externo	6,67	0,067	Peso (gr)	Diferencia (gr)
6	6,61	0,066	0,056	0,011
Interno	6,65	0,067		
2,33	Promedio	0,067		
	$\sigma$	0,087%		
	P 1 gota ajustado	0,067		

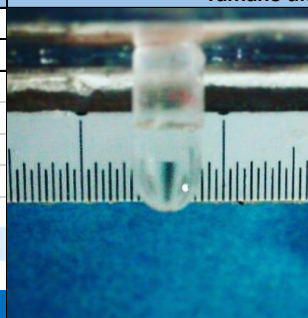


2. Datos teoricos y practicos de cada orificio de la fila 2 del formador de gotas.

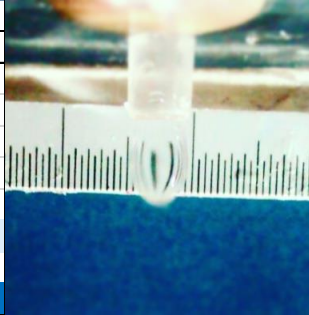
FILA 2 SIN FC			Tamaño diametro de gota	
Valores obtenidos de gota			Valores teóricos	
DIAMETROS (mm)	100 gotas (gr)	1 gota (gr)	Diametro (mm)	Diferencia (mm)
	8,07	0,081	5	0
Externo	7,96	0,080	Peso (gr)	Diferencia (gr)
5	7,7	0,077	0,065	0,014
Interno	7,71	0,077		
2,9	8,14	0,081		
	Promedio	0,079		
	$\sigma$	0,182%		
	P 1 gota ajustado	0,079		



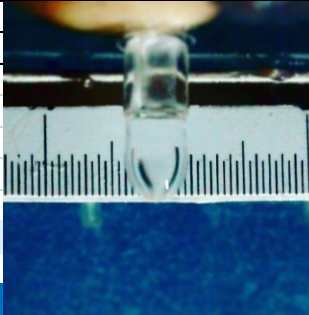
FILA 2 SIN FC			Tamaño diametro de gota	
Valores obtenidos de gota			Valores teóricos	
DIAMETROS (mm)	100 gotas (gr)	1 gota (gr)	Diametro (mm)	Diferencia (mm)
	6,65	0,067	5	0
	6,52	0,065	Peso (gr)	Diferencia (gr)
Externo	6,6	0,066	0,065	0,001
5	6,64	0,066		
Interno	6,56	0,066		
2,8	Promedio	0,066		
	$\sigma$	0,049%		
	P 1 gota ajustado	0,066		



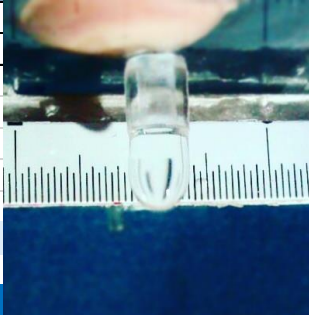
FILA 1 SIN FC			Tamaño diametro de gota	
Valores obtenidos de gota			Valores teóricos	
DIAMETROS (mm)	100 gotas (gr)	1 gota (gr)	Diametro (mm)	Diferencia (mm)
	6,36	0,064	4,95	0,05
	6,19	0,062	Peso (gr)	Diferencia (gr)
Externo	6,23	0,062	0,065	-0,003
5	6,19	0,062		
Interno	6,16	0,062		
2,7	Promedio	0,062		
	$\sigma$	0,071%		
	P 1 gota ajustado	0,062		



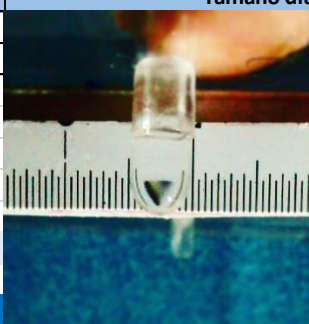
FILA 2 CON			Tamaño diametro de gota	
Valores obtenidos de gota			Valores teóricos	
DIAMETROS (mm)	100 gotas (gr)	1 gota (gr)	Diametro (mm)	Diferencia (mm)
	7,65	0,077	5	0
Externo	7,62	0,076	Peso (gr)	Diferencia (gr)
5	7,62	0,076	0,039	0,037
Interno	7,39	0,074		
1,59	7,52	0,075		
	Promedio	0,076		
	$\sigma$	0,001		
	P 1 gota ajustado	0,076		



FILA 2 CON			Tamaño diametro de gota	
Valores obtenidos de gota			Valores teóricos	
DIAMETROS (mm)	100 gotas (gr)	1 gota (gr)	Diametro (mm)	Diferencia (mm)
	7,03	0,070	5	0
Externo	7,35	0,074	Peso (gr)	Diferencia (gr)
5	7,64	0,076	0,039	0,035
Interno	7,71	0,077		
1,79	7,17	0,072		
	Promedio	0,074		
	$\sigma$	0,003		
	P 1 gota ajustado	0,074		



FILA 2 CON			Tamaño diametro de gota	
Valores obtenidos de gota			Valores teóricos	
DIAMETROS (mm)	100 gotas (gr)	1 gota (gr)	Diametro (mm)	Diferencia (mm)
	7,99	0,080	4,99	0,01
Externo	7,62	0,076	Peso (gr)	Diferencia (gr)
5	7,99	0,080	0,039	0,040
Interno	7,95	0,080		
1,69	8,09	0,081		
	Promedio	0,079		
	$\sigma$	0,002		
	P 1 gota ajustado	0,079		



3. Datos teóricos y prácticos de cada orificio de la fila 3 del formador de gotas.

FILA 3 SIN FC			Tamaño diametro de gota	
Valores obtenidos de gota			Valores teóricos	
DIAMETROS (mm)	PESO (gr)	1 gota (gr)	Diametro (mm)	Diferencia (mm)
	3,42	0,034	4,5	-0,5
Externo	3,4	0,034	Peso (gr)	Diferencia (gr)
4	3,62	0,036	0,033	0,003
Interno	3,75	0,038		
1,54	3,72	0,037		
	Promedio	0,036		
	$\sigma$	0,001		
	P 1 gota ajustado	0,036		

FILA 3 SIN FC			Tamaño diametro de gota	
Valores obtenidos de gota			Valores teóricos	
DIAMETROS (mm)	PESO (gr)	1 gota (gr)	Diametro (mm)	Diferencia (mm)
	3,46	0,035	4	0
Externo	3,37	0,034	Peso (gr)	Diferencia (gr)
4	3,43	0,034	0,033	0,001
Interno	3,42	0,034		
1,44	3,35	0,034		
	Promedio	0,034		
	$\sigma$	0,000		
	P 1 gota ajustado	0,034		

FILA 3 SIN FC			Tamaño diametro de gota	
Valores obtenidos de gota			Valores teóricos	
DIAMETROS (mm)	PESO (gr)	1 gota (gr)	Diametro (mm)	Diferencia (mm)
	3,26	0,033	4	0
Externo	3,27	0,033	Peso (gr)	Diferencia (gr)
4	3,29	0,033	0,033	-0,001
Interno	3,22	0,032		
1,34	3,17	0,032		
	Promedio	0,032		
	$\sigma$	0,000		
	P 1 gota ajustado	0,032		

FILA 3 CON FC			Tamaño diametro de gota	
Valores obtenidos de gota			Valores teóricos	
DIAMETROS (mm)	PESO (gr)	1 gota (gr)	Diametro (mm)	Diferencia (mm)
	2,88	0,029	4,5	-0,5
Externo	2,83	0,028	Peso (gr)	Diferencia (gr)
4	2,8	0,028	0,033	-0,005
Interno	2,75	0,028		
1,18	2,81	0,028		
	Promedio	0,028		
	$\sigma$	0,000		
	P 1 gota ajustado	0,028		

FILA 3 CON FC			Tamaño diametro de gota	
Valores obtenidos de gota			Valores teóricos	
DIAMETROS (mm)	PESO (gr)	1 gota (gr)	Diametro (mm)	Diferencia (mm)
	2,76	0,028	4,5	-0,5
Externo	2,73	0,027	Peso (gr)	Diferencia (gr)
4	2,76	0,028	0,033	-0,006
Interno	2,67	0,027		
1,09	2,67	0,027		
	Promedio	0,027		
	$\sigma$	0,000		
	P 1 gota ajustado	0,027		

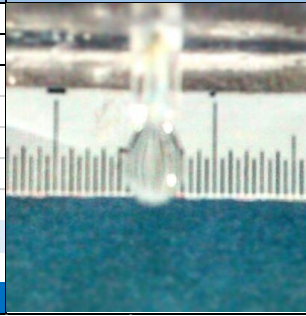
FILA 3 CON FC			Tamaño diametro de gota	
Valores obtenidos de gota			Valores teóricos	
DIAMETROS (mm)	PESO (gr)	1 gota (gr)	Diametro (mm)	Diferencia (mm)
	2,04	0,020	4,25	-0,25
Externo	2,96	0,030	Peso (gr)	Diferencia (gr)
4	2,87	0,029	0,033	-0,007
Interno	2,98	0,030		
0,98	2,02	0,020		
	Promedio	0,026		
	$\sigma$	0,004		
	P 1 gota ajustado	0,026		

4. Datos teoricos y practicos de cada orificio de la fila 4 del formador de gotas.

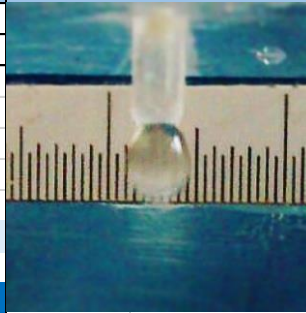
FILA 4 SIN FC			Tamaño diametro de gota	
Valores obtenidos de gota			Valores teóricos	
DIAMETROS (mm)	PESO (gr)	1 gota (gr)	Diametro (mm)	Diferencia (mm)
	3,37	0,034	4	-1
Externo	3,28	0,033	Peso (gr)	Diferencia (gr)
3	3,1	0,031	0,014	0,018
Interno	3,14	0,031		
0,71	3,33	0,033		
		0,032		
		0,001		
		0,032		

FILA 4 SIN FC			Tamaño diametro de gota	
Valores obtenidos de gota			Valores teóricos	
DIAMETROS (mm)	PESO (gr)	1 gota (gr)	Diametro (mm)	Diferencia (mm)
	2,99	0,030	4	-1
Externo	3,12	0,031	Peso (gr)	Diferencia (gr)
3	3,12	0,031	0,014	0,017
Interno	3,12	0,031		
0,61	3,11	0,031		
		0,031		
		0,001		
		0,031		

FILA 4 SIN FC			Tamaño diametro de gota	
Valores obtenidos de gota			Valores teóricos	
DIAMETROS (mm)	PESO (gr)	1 gota (gr)	Diametro (mm)	Diferencia (mm)
	2,38	0,024	4	-1
Externo	2,38	0,024	Peso (gr)	Diferencia (gr)
3	2,39	0,024	0,014	0,010
Interno	2,43	0,024		
0,51	2,38	0,024		
	Promedio	0,024		
	$\sigma$	0,000		
	P 1 gota ajustado	0,024		



FILA 4 CON FC			Tamaño diametro de gota	
Valores obtenidos de gota			Valores teóricos	
DIAMETROS (mm)	PESO (gr)	1 gota (gr)	Diametro (mm)	Diferencia (mm)
	1,88	0,019	3,5	-0,5
Externo	1,88	0,019	Peso (gr)	Diferencia (gr)
3	1,78	0,018	0,014	0,004
Interno	1,83	0,018		
0,61	1,87	0,019		
		0,018		
		0,000		
		0,018		



FILA 4 CON FC			Tamaño diametro de gota	
Valores obtenidos de gota			Valores teóricos	
DIAMETROS (mm)	PESO (gr)	1 gota (gr)	Diametro (mm)	Diferencia (mm)
Externo	1,25	0,013	3,5	-0,5
3	1,27	0,013	Peso (gr)	Diferencia (gr)
Interno	1,26	0,013	0,014	-0,001
0,51	1,23	0,012		
	1,27	0,013		
		0,013		
		0,000		
		0,013		

